



Universidad Nacional Autónoma de México

Facultad de Estudios Superiores

Aragón

**Amplificador de audio para guitarra con ecualización
inalámbrica mediante aplicación móvil.**

T E S I S

Que para obtener el título de:

INGENIERO ELÉCTRICO ELECTRÓNICO

Presenta:

Diego Juárez Ramírez

Yered Xchel Aguirre Ronquillo

Director de tesis:

Dr. Ismael Díaz Rangel



Ciudad Nezahualcóyotl, Estado de México, 2020



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Agradecimientos

Nosotros Diego Juárez Ramírez y Yered Xchel Aguirre Ronquillo queremos agradecer a nuestro asesor de tesis, el Dr. Ismael Díaz Rangel y a todo el Grupo IDEA de la FES Aragón, quienes con sus conocimientos, paciencia y apoyo nos guiaron en cada una de las etapas para el desarrollo de este trabajo de tesis.

Igualmente agradecemos a la Universidad Nacional Autónoma de México y a la Facultad de Estudios Superiores Aragón por brindarnos los recursos, el espacio y herramientas necesarias que fueron de suma importancia para nuestra formación como futuros Ingenieros.

Finalmente damos gracias a todos los profesores y compañeros de carrera que hicieron que nuestra etapa universitaria se volviera un grato recuerdo en nuestras vidas.

Muchas gracias a todas y a todos.

Agradecimientos personales

Yo Diego Juárez Ramírez quiero dedicar este trabajo de titulación a mi madre Maricela Ramírez Bautista y a mi padre Saúl Juárez Orta. Palabras y acciones me faltan para agradecerles todo el esfuerzo y sacrificio que han hecho para que a mí no me falte nada. Esto es amor en su forma más pura y quiero que sepan que su hijo nunca se olvidará de ustedes. Los amo.

Papá, mamá, muchas gracias.

Yo Yered Xchel Aguirre Ronquillo agradezco a mi familia, amigos y profesores por haberme apoyado en todo este camino, sé que sin su ayuda no hubiera podido terminar de la manera apropiada, aun así, quiero aprovechar este espacio para agradecerme a mí mismo porque a pesar de todas las dificultades presentadas en el 2020 para poder terminar, no me di por vencido y fui capaz de presentar el dispositivo funcional.

Índice de ilustraciones

Ilustración 2.1 Guitarra de finales del siglo XVI.	6
Ilustración 2.2 Guitarra Fender Broadcaster.	6
Ilustración 2.3 Partes de una guitarra.	8
Ilustración 2.4 Pastillas single coil.	10
Ilustración 2.5 Pastillas humbucker.	10
Ilustración 2.6 Frecuencias de la guitarra.	11
Ilustración 2.7 Terminales de un amplificador operacional.	12
Ilustración 2.8 Diagrama electrónico de un seguidor de voltaje.	13
Ilustración 2.9 Diagrama electrónico de un amplificador inversor.	13
Ilustración 2.10 Diagrama electrónico de un amplificador no inversor.	14
Ilustración 2.11 Gráfica de respuesta de un filtro pasa bajas.	16
Ilustración 2.12 Gráfica de respuesta de un filtro pasa banda.	17
Ilustración 2.13 Gráfica de respuesta de un filtro pasa altas.	17
Ilustración 2.14 Gráfica de respuesta de un filtro rechaza banda.	17
Ilustración 2.15 Representación gráfica de filtro pasa todo ideal.	18
Ilustración 2.16 Filtro pasa bajas.	18
Ilustración 2.17 Filtro pasa banda.	18
Ilustración 2.18 Filtro pasa altas.	19
Ilustración 2.19 Filtro rechaza banda.	19
Ilustración 2.20 Filtro pasa todo.	19
Ilustración 2.21 Módulo: respuesta del filtro.	20
Ilustración 2.22 Especificaciones.	20
Ilustración 2.23 Características de la frecuencia de paro.	21

Ilustración 2.24 Gráfica de respuesta.....	21
Ilustración 2.25 Respuestas para el filtro.....	22
Ilustración 2.26 Topología de los filtros.....	22
Ilustración 2.27 Características de la topología.....	23
Ilustración 2.28 Circuito generado del filtro.....	23
Ilustración 2.29 Tolerancias de resistencias y capacitores.....	24
Ilustración 2.30 Encapsulado del LM3886.....	25
Ilustración 2.31 Resistencias que definen la ganancia.....	27
Ilustración 2.32 Resistencias para equilibrar la corriente.....	27
Ilustración 2.33 Capacitor de acople.....	28
Ilustración 2.34 Capacitor pasa bajas del bucle de retroalimentación.....	29
Ilustración 2.35 Capacitor pasa bajas de la entrada no inversora.....	29
Ilustración 2.36 Capacitor C_f y resistencia R_{f2}	30
Ilustración 2.37 Red de Zobel.....	30
Ilustración 2.38 Diagrama de bloques de un sistema continuo y un sistema discreto.....	31
Ilustración 2.39 Diagrama de bloques de un sistema de control de lazo abierto.....	32
Ilustración 2.40 Diagrama de bloques de un sistema de control de lazo cerrado.....	33
Ilustración 2.41 Diagrama de bloques de un sistema de control digital.....	33
Ilustración 2.42 Esquema de un microcontrolador.....	34
Ilustración 2.43 Logotipo de Arduino.....	35
Ilustración 2.44 Microcontroladores Atmel de la familia AVR.....	35
Ilustración 2.45 Arduino Mega 2560.....	36
Ilustración 2.46 Interfaz principal de Arduino IDE.....	37
Ilustración 2.47 Resistencia fijas.....	40

Ilustración 2.48 Resistencias ajustables y variables.....	41
Ilustración 2.49 Interior de un potenciómetro	42
Ilustración 2.50 Configuración de pines del potenciómetro digital.....	43
Ilustración 2.51 Diagrama de bloques del potenciómetro digital.....	45
Ilustración 2.52 Funciones del potenciómetro digital.....	45
Ilustración 2.53 Pantalla LCD de 16x2.....	46
Ilustración 2.54 Módulo Bluetooth HC-05.....	47
Ilustración 2.55 Sección de diseño de App Inventor 2.	48
Ilustración 2.56 Editor de bloques de App Inventor 2.	49
Ilustración 2.57 Diagrama de una bocina.	50
Ilustración 2.58 Relación entre impedancia y resistencia de una bocina.	50
Ilustración 2.59 Índice de directividad de una bocina.	51
Ilustración 2.60 Diagrama a bloques de una fuente de alimentación.....	52
Ilustración 2.61 Rectificador de diodos.	52
Ilustración 2.62 Filtro de capacitor a la entrada.	53
Ilustración 2.63 Regulador lineal.	53
Ilustración 3.1 Diagrama a bloques del sistema.	56
Ilustración 3.2 Respuesta del filtro de 5° orden.	57
Ilustración 3.3 Características de la frecuencia de paro para el filtro pasa bajas.	58
Ilustración 3.4 Diagrama del circuito.....	59
Ilustración 3.5 Respuesta del filtro de 6° orden.	60
Ilustración 3.6 Características de la frecuencia de paro para el filtro pasa altas.	60
Ilustración 3.7 Diagrama del filtro pasa bajas.	61
Ilustración 3.8 Respuesta del filtro de 4° orden.	62

Ilustración 3.9 Frecuencia de corte inicial.....	63
Ilustración 3.10 Frecuencia de corte final.....	63
Ilustración 3.11 Especificaciones de la frecuencia de paro para el filtro pasa banda.....	63
Ilustración 3.12 Diagrama del circuito.....	64
Ilustración 3.13 Diagrama del control de ganancia.....	65
Ilustración 3.14 Sumador.....	65
Ilustración 3.15 Esquemático del ecualizador de tres bandas con control de ganancia.....	68
Ilustración 3.16 Cara inferior de la placa fenólica.....	69
Ilustración 3.17 Cara superior de la placa fenólica.....	69
Ilustración 3.18 Cara superior de la placa fenólica.....	70
Ilustración 3.19 Cara inferior de la placa fenólica.....	70
Ilustración 3.20 Cara inferior de la placa fenólica.....	71
Ilustración 3.21 Cara superior de la placa fenólica.....	71
Ilustración 3.22 Interfaz gráfica de la aplicación.....	72
Ilustración 3.23 Diagrama de flujo de la función conectar.....	73
Ilustración 3.24 Bloques de la función conectar.....	74
Ilustración 3.25 Proceso de conexión Bluetooth.....	74
Ilustración 3.26 Diagrama de flujo del bloque de recepción en la aplicación.....	75
Ilustración 3.27 Bloque de recepción de información.....	76
Ilustración 3.28 Diagrama de la transmisión de la información.....	77
Ilustración 3.29 Bloque de instrucciones cuando un selector cambia de posición.....	77
Ilustración 3.30 Diagrama de bloques de la comunicación bidireccional.....	78
Ilustración 3.31 Esquemático de conexiones de la etapa de control digital.....	79
Ilustración 3.32 Diagrama de flujo del programa principal.....	80

Ilustración 3.33 Diagrama de flujo del modo convencional.....	81
Ilustración 3.34 Diagrama de flujo del modo inalámbrico.	82
Ilustración 3.35 Diagrama del circuito amplificador de potencia	83
Ilustración 3.36 Diagrama del amplificador de potencia.....	85
Ilustración 3.37 PCB del amplificador de potencia.	86
Ilustración 3.38 Esquema de la fuente de alimentación.....	87
Ilustración 4.1 Pruebas con Arduino nano.....	91
Ilustración 4.2 Versión inicial de la aplicación.	92
Ilustración 4.3 Conjunto de bloques de la versión inicial de la aplicación.....	92
Ilustración 4.4 Código de recepción en Arduino.....	92
Ilustración 4.5 Segunda versión de la aplicación.	93
Ilustración 4.6 Versión final de la aplicación.	94
Ilustración 4.7 Configuración de cada slider.	94
Ilustración 4.8 Código de prueba.	95
Ilustración 4.9 Manipulación de los Sliders.	95
Ilustración 4.10 Valores recibidos en Arduino.....	95
Ilustración 4.11 Botones.	96
Ilustración 4.12 Letra B recibida en la aplicación.....	97
Ilustración 4.13 Letra A recibida en la aplicación.	97
Ilustración 4.14 Señal de control repetida	97
Ilustración 4.15 Instrucciones adicionales para señales repetidas.....	98
Ilustración 4.16 Valores mostrados en el LCD.	98
Ilustración 4.17 Valores mostrados en la aplicación.....	99
Ilustración 4.18 Respuesta del potenciómetro digital.	100

Ilustración 4.19 Tone Stack Calculator.....	101
Ilustración 4.20 Prueba de funcionamiento del ecualizador de tres bandas con control de ganancia.	102
Ilustración 4.21 Prueba del filtro pasa bajas a 100 Hz.....	103
Ilustración 4.22 Prueba del filtro pasa bajas a 500 Hz.....	103
Ilustración 4.23 Prueba del filtro pasa bajas a 1 KHz.	104
Ilustración 4.24 Prueba del filtro pasa banda a 500 Hz.	104
Ilustración 4.25 Prueba del filtro pasa banda a 1.4 KHz.	105
Ilustración 4.26 Prueba del filtro pasa banda a 2 KHz.	105
Ilustración 4.27 Prueba del filtro pasa altas 1 KHz.....	106
Ilustración 4.28 Pruebas del filtro pasa altas 1.5 KHz.	106
Ilustración 4.29 Pruebas del filtro pasa altas a 2.8 KHz.....	107
Ilustración 4.30 Filtros unificados por cables formando la etapa de ecualización de tres bandas con control de ganancia.....	107
Ilustración 4.31 Comportamiento del filtro sin ganancia.	108
Ilustración 4.32 Comportamiento del filtro con ganancia máxima.....	109
Ilustración 4.33 Ganancia máxima en el filtro pasa bajas.	109
Ilustración 4.34 Ganancia máxima en el filtro pasa banda.	110
Ilustración 4.35 Ganancia máxima en el filtro pasa altas.	110
Ilustración 4.36 Primer PCB de la etapa de potencia.....	111
Ilustración 4.37 Prueba de sonido con teléfono móvil.....	111
Ilustración 4.38 Pruebas con la guitarra.....	112
Ilustración 4.39 Prueba de funcionamiento de la fuente con los dispositivos analógicos y con audio estéreo proveniente de un dispositivo móvil.	113

Ilustración 4.40 Prueba de funcionamiento de la fuente con los dispositivos analógicos y con audio proveniente de una guitarra electroacústica.	113
Ilustración 4.41 Pruebas con la fuente con todo el sistema conectado con audio de un dispositivo móvil.	114
Ilustración 4.42 Pruebas con la fuente con todo el sistema conectado con audio de un guitarra electroacústica.	114

Índice de tablas

Tabla 2-1 Descripción de los pines del potenciómetro digital.	44
Tabla 2-3 Configuración de pines de la pantalla LCD	46
Tabla 3-1 Valores de los componentes del amplificador de potencia.	85
Tabla 4-1 Resultados de las mediciones del divisor de tensión	93

1 Introducción

La música es tan antigua como la historia de la humanidad, y está vinculada al origen de sus actividades fundamentales, como el lenguaje y la comunicación. No existe civilización alguna que no haya manifestado interés por el canto, por la danza o por la invención de instrumentos musicales [1].

La guitarra eléctrica se adapta a todo tipo de música y se vuelve popular desde la década de 1960 cuando se establece como el principal instrumento en los grupos de música pop [2].

Actualmente, este instrumento se utiliza en una gran variedad de géneros y estilos musicales entre los que destacan el rock and roll, el blues, el heavy metal, el funk, el reggae, el jazz, el country, el surf, entre otros más.

Casi uno de cada cinco mexicanos dice saber tocar un instrumento musical, destacando como el principal a la guitarra con un 43.6%, y después la flauta con un 9%, la batería con un 6% y el saxofón con un 4%, según Consulta Mitofsky [3].

La señal de salida de una guitarra eléctrica por sí sola, no es capaz de excitar un altavoz. Para hacerlo dicha señal debe alcanzar un cierto nivel de amplitud para que pueda ser escuchada; es decir, debe ser amplificada. El artefacto que realiza esta adecuación de nivel es el amplificador.

Un amplificador para guitarra cuenta con controles de ganancia; que provocan un aumento o atenuación en la amplitud de la señal y controles de tono que actúan sobre la respuesta en frecuencia del amplificador incrementando o disminuyendo aquellas frecuencias de interés (bajos, medios y agudos), a este concepto se le denomina ecualización [4].

En esta propuesta se elaboró un dispositivo capaz de amplificar las señales que emite una guitarra eléctrica para poder ser escuchadas en un altavoz con la particularidad de que el sonido puede ser ecualizado tanto de manera convencional, con una botonera en el panel del amplificador, como de manera inalámbrica con el uso de una aplicación para teléfonos inteligentes con sistema operativo Android.

1.1 Objetivo general

Desarrollar un amplificador de audio para guitarra que permita manipular los parámetros de ganancia y ecualización por medio de una aplicación para dispositivos Android.

1.2 Objetivos particulares

- ☞ Crear una aplicación móvil para la selección de ajustes de ganancias.
- ☞ Enlazar la aplicación móvil y el amplificador mediante comunicación Bluetooth bidireccional.
- ☞ Incorporar en el amplificador un display y botones para el control de ajustes.
- ☞ Crear una etapa de acoplamiento entre la electrónica digital y la analógica.
- ☞ Diseñar filtros analógicos para ajuste de frecuencias bajas, medias y agudas.
- ☞ Diseñar una etapa de ganancia general ajustable mediante amplificadores operacionales para audio.
- ☞ Acondicionar un circuito de potencia para el transductor de salida.
- ☞ Implementar una fuente de potencia según los requerimientos de consumo del amplificador propuesto.
- ☞ Utilizar un microcontrolador para la gestión de las funciones.

1.3 Justificación

El dispositivo que se pretende implementar busca brindar una solución de manera que el amplificador pueda ser controlado por Bluetooth y que así brinde la facilidad de modificar valores en el ecualizador y volumen del amplificador, ayudando de esta forma a la comunidad de guitarristas que padezcan de alguna discapacidad motriz en sus extremidades inferiores y en sí a la comunidad de guitarristas en general. Adicionalmente, al ecualizar desde el lugar de trabajo es posible conseguir el sonido que realmente se está buscando sin necesidad de la ayuda de terceros ya que, al hacerlo de manera convencional, el usuario se encuentra muy cerca de la bocina y la percepción del sonido es diferente a como en verdad se busca que el sonido sea escuchado en el lugar deseado.

1.4 Actividades

- ☞ Investigar acerca del entorno de desarrollo de software App Inventor.
- ☞ Desarrollar una aplicación para teléfonos inteligentes con sistema operativo Android.

- ☞ Probar el funcionamiento de la aplicación.
- ☞ Buscar los diferentes tipos de dispositivos Bluetooth y como se enlaza al microcontrolador.
- ☞ Enlazar el dispositivo Bluetooth al microcontrolador y al dispositivo Android.
- ☞ Realizar pruebas de recepción y envío de datos al Bluetooth.
- ☞ Indagar en los diferentes tipos de acopladores y elegir el más conveniente.
- ☞ Implementar un circuito de acoplamiento entre la etapa de filtrado y la etapa de control.
- ☞ Comprobar que en el circuito de acoplamiento no interfieren las señales digitales con las señales analógicas.
- ☞ Buscar los diferentes tipos de displays y botones.
- ☞ Estudiar las características de las frecuencias que generan las guitarras.
- ☞ Estudiar las características, aplicaciones y tipos de amplificadores operacionales.
- ☞ Investigar los diferentes tipos de filtros analógicos.
- ☞ Definir frecuencias de operación para los filtros a implementarse.
- ☞ Desarrollar el circuito ecualizador de tres bandas.
- ☞ Realizar pruebas de funcionamiento al ecualizador de tres bandas.
- ☞ Diseñar circuitos que controlen la ganancia por medio de amplificadores operacionales.
- ☞ Elaborar el circuito de control de ganancia.
- ☞ Investigar acerca de los circuitos preamplificadores.
- ☞ Definir un circuito preamplificador.
- ☞ Investigar acerca de las fuentes de alimentación y su relación con la etapa de potencia.
- ☞ Definir los voltajes de operación para cada etapa.
- ☞ Calcular la potencia necesaria para cada etapa.
- ☞ Buscar un módulo de Arduino que se ajuste a las necesidades.
- ☞ Diseñar algoritmos para la programación del microcontrolador.
- ☞ Comprobar que el microcontrolador realiza bien sus algoritmos.
- ☞ Unificar las etapas.
- ☞ Realizar pruebas de funcionamiento al sistema completo.
- ☞ Armar un gabinete que cumpla con las necesidades del amplificador.

1.5 Antecedentes

Las empresas Marshall, Fender y Boss, entre el 2016 y 2018 crearon y sacaron a la venta amplificadores digitales con presets de efectos y emulaciones de amplificadores pregrabados, el amplificador se puede conectar a un teléfono con sistema operativo Android o iOS por medio de Bluetooth, para los 3 amplificadores las compañías desarrollaron sus propias aplicaciones telefónicas con las cuales se puede crear presets nuevos y/o modificar las configuraciones de los presets pregrabados, como por ejemplo su ganancia de frecuencias graves, agudas y medias, así como también el volumen y ganancia general, sin embargo, estas aplicaciones únicamente pueden hacer modificaciones en los efectos previamente grabados y no cuentan con una comunicación bidireccional [5].

En la Universidad Pública de Navarra, se desarrolló una propuesta en la que se detalla el proceso de diseño y construcción de un amplificador de guitarra de alta ganancia con tecnología valvular gobernado de forma remota mediante un pedal de control (footswitch) comunicado por Bluetooth. Uno de los retos del proyecto es no emplear ningún elemento semiconductor en la implementación del amplificador de audio para preservar la esencia del amplificador valvular.

En este amplificador, el acoplamiento realizado para poder variar un valor resistivo de manera inalámbrica es conformado por un arreglo de fotorresistencias LDR ya que esta componente puede variar desde unos pocos ohmios (100Ω aproximadamente) cuando hay un haz de luz apuntando a la fotorresistencia hasta valores del orden de los mega ohmios en ausencia de luz [6].

Otro proyecto relacionado fue implementado en la Universidad Politécnica de Cartagena. El trabajo desarrolla el diseño, cálculo y la construcción de un equipo de efectos digitales para guitarra eléctrica, programados en un procesador digital de señales (DSP) por sus siglas en inglés controlada por un Arduino UNO y comandado de manera inalámbrica con el uso de infrarrojos. Se estudian los diferentes tipos de efectos, se analizan diferentes configuraciones de hardware y sus limitaciones.

Para ello se han empleado programas de diseño tales como: PsPice (simular la adaptación de la señal analógica), Fritzing (para la representación gráfica de los esquemáticos de los

circuitos empleados), Eagle (diseño de los circuitos impresos) y el entorno de programación de Arduino IDE (programa de control por infrarrojos/teclado y del DSP) [7].

1.6 Organización del trabajo

Capítulo 2. Marco Teórico. Se detallan los tipos de guitarra existentes, tipos de filtros y los amplificadores de audio. Igualmente se describen los componentes electrónicos utilizados y los entornos de programación empleados.

Capítulo 3. Desarrollo experimental. En este capítulo se hace un planteamiento y descripción minuciosa de la metodología a seguir para la elaboración del amplificador propuesto, cumpliendo los objetivos establecidos en esta sección.

Capítulo 4. Pruebas y Resultados. Es en este capítulo donde se presentan las pruebas que se hicieron con los filtros, la etapa de potencia y la etapa de control, mostrando los resultados obtenidos a través de los experimentos realizados durante el proceso de elaboración.

Se finaliza este trabajo proporcionando las conclusiones e indicando las mejoras a realizar en un futuro.

2 Marco teórico

2.1 La guitarra

La guitarra, es un instrumento musical que procede de Arabia, según la opinión más generalizada. Las formas de la guitarra han sido numerosas antes de llegar al estado moderno, y lo mismo los diversos nombres que ha recibido.

En el siglo XV se diferenciaba poco de la forma que hoy tiene, si bien era más pequeña y sólo constaba, a lo más, de siete cuerdas en cuatro órdenes, es decir, tres cuerdas duplicadas y una sencilla que era la primera, las cuales producen el sonido mediante la vibración de sus cuerdas, para acompañar las danzas y las canciones del pueblo.

La forma de la guitarra y el número de cuerdas variaron mucho durante la Edad Media. Praetorius trae el dibujo (ilustración 2.1) de una guitarra de fines del siglo XVI encordada con cinco órdenes de cuerdas y una sencilla [8].

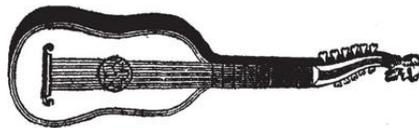


Ilustración 2.1 Guitarra de finales del siglo XVI.

Se produce un desarrollo significativo cuando a finales de la década de 1940 el cuerpo se hace de una pieza sólida, no como una caja hueca. La primera guitarra de este tipo comercializada es la Fender Broadcaster (ilustración 2.2), diseñada por Leo Fender y otros e introducida en 1950, renombrada como Telecaster en 1951 [2].



Ilustración 2.2 Guitarra Fender Broadcaster.

2.2 Tipos de guitarras

Existen diversos tipos de guitarra, cada una de ellas enfocadas a un propósito diferente, debido a la gran variedad, en este documento se detallarán los modelos más comunes y se centrará particularmente en la guitarra eléctrica y sus características electrónicas [9].

2.2.1 Guitarra clásica.

Es la que comúnmente se denomina guitarra española. Este tipo de guitarra no posee trastes marcados, y es elaborada con maderas finas para que se proyecte de manera perfecta su sonido a través de la caja de resonancia.

Además, esta guitarra usa cuerdas de nylon, y es la guitarra que se utiliza para los conciertos de música académica.

2.2.2 Guitarra Acústica.

Este tipo de guitarra utiliza cuerdas elaboradas con nylon y alambre generalmente, pero las hay elaboradas sólo de metal.

Se les llama guitarra acústica, del idioma inglés acoustic guitar. Este término es utilizado para diferenciar la guitarra de caja con la guitarra eléctrica, a pesar de que la guitarra es un instrumento acústico por definición.

Esta guitarra fue creada por lutieres estadounidenses a finales del siglo XIX, conocidas como western guitars.

2.2.3 Guitarra Electroacústica.

En la electrificación de una guitarra de caja, ésta no necesita micrófono, ya que la conexión es la misma que la de una guitarra eléctrica a un amplificador.

La guitarra electroacústica emplea transductores piezoeléctricos que dan un sonido agudo y natural.

2.2.4 Guitarra Eléctrica.

Es un instrumento musical que normalmente tienen seis cuerdas de metal y gracias al principio de inducción electromagnética convierte las vibraciones de sus cuerdas en señales eléctricas, por medio de uno o más transductores denominados “pastillas” [10]. La señal de

salida de la guitarra se necesita amplificar para que logre excitar una bocina y de esta manera se pueda escuchar de manera clara.

2.3 Partes de una guitarra eléctrica.

En la ilustración 2.3 se observan las diferentes partes de una guitarra y a continuación se describen cada una de ellas [11].



Ilustración 2.3 Partes de una guitarra.

2.3.1 El clavijero.

Con seis clavijas, una para cada cuerda, su función es modificar la tensión de las cuerdas. Esta parte de la guitarra interviene en la afinación. Hay un poste giratorio por cada clavija en donde se enrollan las cuerdas.

2.3.2 Mástil.

El mástil es donde se posa la mano izquierda para los que son diestros. Se compone de una pieza larga de madera y su función es dar sustento al diapasón y al conjunto de cuerdas.

2.3.3 Diapasón.

Se trata de una pieza hecha en madera y que está fija sobre y a lo largo del mástil. En su superficie se insertan los trastes.

2.3.4 Trastes.

Son barras de metal ubicadas transversalmente en el mástil. Esta parte de la guitarra influye directamente en la calidad de la misma. Al pulsar una cuerda sobre algún traste se reproduce una determinada nota. Algunos espacios entre trastes, se encuentran unas incrustaciones en forma de puntos que son ayuda visual al momento de tocar.

2.3.5 El cuerpo

Es la parte de la guitarra que define su forma y es la más característica. Se conforma por un bloque en madera sólida, en donde se alojan todos los componentes electrónicos y el cableado.

2.3.6 Pastillas.

Tienen la función de captar el sonido que producen las cuerdas metálicas. Se conforman por un núcleo que contiene una bobina magnética (hilo de cobre enrollado en forma de espiras sobre un imán).

Los cambios que se producen en la bobina cuando un componente de metal se mueve cerca (la vibración de cuerdas) son captados por las pastillas. Las vibraciones son transmitidas como señales eléctricas por medio del circuito del instrumento hasta la salida o conexión de cable.

A continuación, se describirán algunos tipos de pastillas:

- ☞ **Pastillas Single Coil o de bobina simple:** Es el tipo de pastilla que podemos encontrar en las guitarras eléctricas Fender Stratocaster. Estas pastillas suelen producir un sonido más limpio y claro, podríamos decir un sonido más vintage. Suele tener la desventaja de que sufren interferencias y que tienen poca fuerza de salida, en la ilustración 2.4 se pueden observar [12]. Las pastillas single coil entregan una señal de $100 \text{ mV}_{\text{RMS}}$ [13].



Ilustración 2.4 Pastillas single coil.

- **Pastillas Humbucker o de bobina doble:** Para eliminar el problema de la distorsión que causan las pastillas single coil, las humbucker (ilustración 2.5) utilizan una combinación de dos bobinados que se enlazan, cancelando de esta manera el ruido. Consiguen un tono más pesado, cálido y muy rico en una enorme variedad de tonos medios [12]. Estas pastillas entregan una señal de $1 V_{RMS}$ [13].



Ilustración 2.5 Pastillas humbucker.

2.3.7 Selector de pastillas y controles.

Son componentes del circuito de la guitarra, usados para cambiar el sonido. El selector de las pastillas define la combinación que se escuchará. Cuando se escoge la fuente del sonido, pasa por los controles. El volumen modula el nivel de la señal, mientras que el tono quita los agudos.

2.3.8 Puente.

El puente es el punto de fijación contrario a los clavijeros. Sobre él se apoyan las cuerdas. Los puentes que tienen movilidad poseen una barra llamada vibrato, por medio de la cual se produce un efecto usado comúnmente es los solos.

2.3.9 Jack de salida

Es el conector de la señal de salida de la guitarra, el cual usa un cable Jack macho de 6.5 mm para enviar la señal a un amplificador.

2.4 Las frecuencias de la guitarra eléctrica.

Así como las frecuencias fundamentales, la mayoría de los instrumentos tienen armónicos, los cuales son muy difícil de encontrar para su manipulación. Aun así, se predice que el rango de frecuencias fundamentales (tonos) de una guitarra eléctrica están en un rango de 82 Hz a 1.397KHz en el mástil. El rango de frecuencias audibles de un amplificador de guitarra eléctrica está entre 100 Hz y 6.2 KHz [14]. En la ilustración 2.6 se visualiza el rango de frecuencias de la guitarra, comparándola contra un piano.

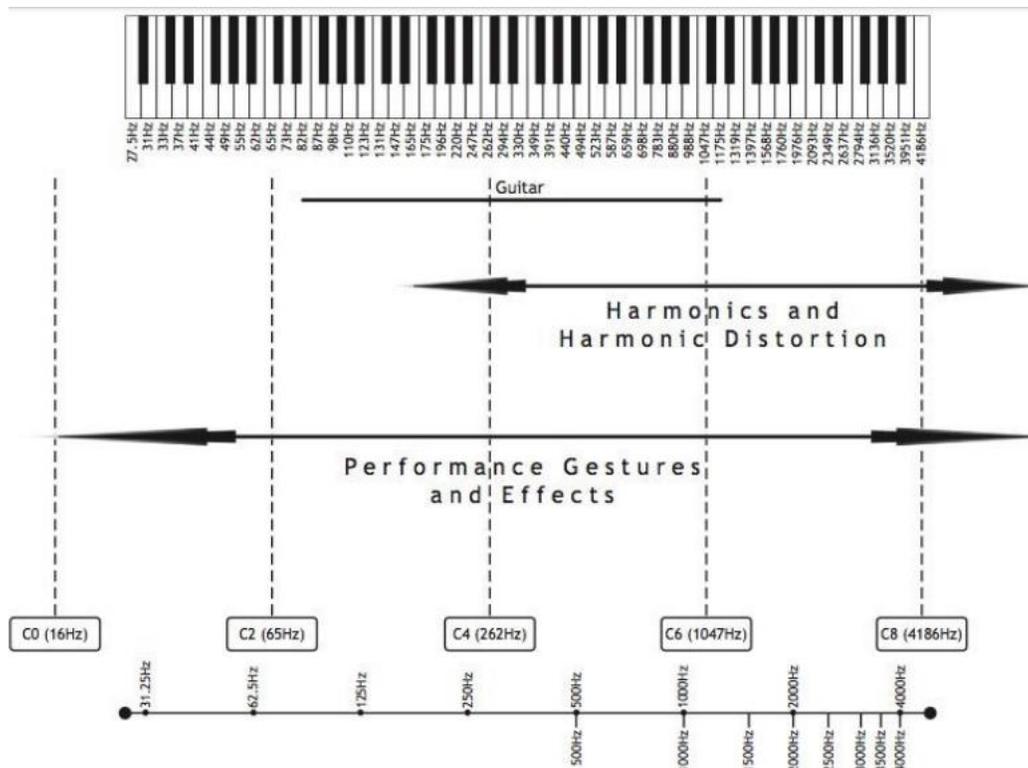


Ilustración 2.6 Frecuencias de la guitarra.

2.5 Amplificador operacional.

El amplificador operacional (OPAM) es un dispositivo amplificador electrónico de alta ganancia acoplado en corriente continua que normalmente posee cinco terminales, en la ilustración 2.7 se indican sus nombres:

1. Entrada inversora.
2. Entrada no inversora
3. Alimentación positiva.
4. Alimentación negativa.
5. Salida.

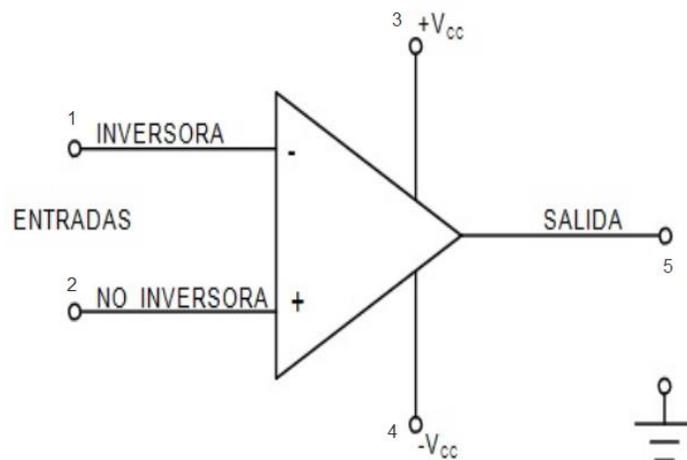


Ilustración 2.7 Terminales de un amplificador operacional.

A continuación, se explicaran las diferentes configuraciones que poseen los amplificadores operacionales [15].

2.5.1 Seguidor de voltaje.

Se usa como un buffer, para eliminar efectos de carga o para adaptar impedancias (conectar un dispositivo con gran impedancia a otro con baja impedancia y viceversa).

En la ilustración 2.8 se observa su diagrama de conexión y en la ecuación 2.1 la fórmula del seguidor de voltaje.

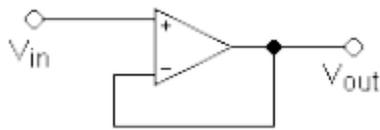


Ilustración 2.8 Diagrama electrónico de un seguidor de voltaje.

$$V_{OUT} = V_{in} \quad 2.1$$

2.5.2 Amplificador inversor.

La señal de salida es igual a la señal de entrada (en forma) multiplicada por una constante y de signo contrario (fase invertida 180°).

En la ilustración 2.9 se visualiza el diagrama de conexión y la ecuación 2.2 describe el comportamiento del amplificador inversor.

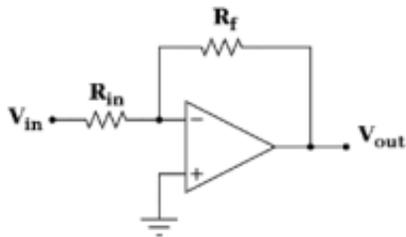


Ilustración 2.9 Diagrama electrónico de un amplificador inversor.

$$V_{OUT} = -V_{in} \frac{R_f}{R_{in}} \quad 2.2$$

2.5.3 Amplificador no inversor.

Multiplica la señal de entrada por una ganancia definida por R_2 y R_1 .

En la ilustración 2.10 se observa el diagrama de conexión y en la ecuación 2.3 la fórmula del amplificador inversor.

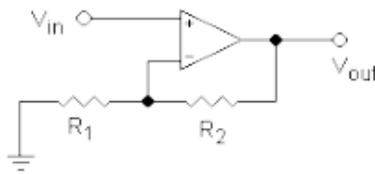


Ilustración 2.10 Diagrama electrónico de un amplificador no inversor.

$$V_{OUT} = V_{in} \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right) \quad 2.3$$

2.6 Filtros electrónicos.

Es un sistema que tienen como función manipular y modificar el espectro de frecuencia de la señal de entrada, para obtener una señal de salida con la función que se desea [16].

A continuación, se mencionan las características de los filtros [17].

2.6.1 Ganancia.

Parámetro que compara la amplitud de la señal de salida con la señal de entrada, en la ecuación 2.4 se observa la fórmula de la ganancia, ésta depende del voltaje de salida y el voltaje de entrada, donde:

K = ganancia

$$K = \frac{V_{OUT}}{V_{in}} \quad 2.4$$

Esta también se puede representar en decibeles con la siguiente ecuación 2.5:

$$dB = 20 \log_{10} \left(\frac{V_{OUT}}{V_{in}} \right) \quad 2.5$$

2.6.2 Frecuencia de corte.

Es la frecuencia que separa la banda pasante de la región de transición del filtro. Para los filtros pasa banda y rechaza banda poseen dos frecuencias de corte: inferior y superior, esto sucede por trabajar entre un rango de frecuencia, que determina cual es el rango de frecuencia que será eliminada y cuál será la banda pasante.

2.6.3 Banda pasante.

Es la banda de frecuencia deseada, en la cual el voltaje de salida obedece el comportamiento descrito en la ecuación 2.6:

$$V_{OUT} = K \cdot V_{in} \quad 2.6$$

2.6.4 Región de transición.

Es la zona donde se presenta la pendiente de caída de ganancia, que va desde la frecuencia de corte del filtro, hasta la banda eliminada. En esta zona, la pendiente del filtro puede variar, dependiendo del tipo de aproximación que se ocupe al momento de diseñar el filtro activo.

2.6.5 Banda eliminada.

Es el rango de frecuencias que se encuentra después de la región de transición, donde la ganancia es mínima, por lo tanto, el voltaje a la salida tiende a cero.

2.6.6 Orden del filtro.

Corresponde a los polos que hay en la ecuación de transferencia que rige el filtro activo, es decir, el orden es igual al exponente del término “s” de la ecuación 2.7, que se encuentra en el denominador.

$$A(s) = \frac{\omega_c}{s + \omega_c} \cdot K \quad 2.7$$

$$\omega_c = 2\pi f$$
$$f = \text{frecuencia [Hz]} \quad 2.8$$

De igual forma el orden del filtro determina que tan exacta será la frecuencia de corte del filtro, es decir, entre mayor es el orden más se aproxima a su respuesta ideal.

2.6.7 Filtros pasivos.

Son dispositivos compuestos por elementos inductivos, capacitivos y resistivos, configurados de determinada forma para que eliminen las frecuencias deseadas. Son comúnmente utilizados y son relativamente económicos en comparación a los filtros activos.

Se les llama pasivos porque estos no necesitan una fuente externa para funcionar, esto quiere decir, que consume la energía que se les proporciona [18].

2.6.8 Filtros activos.

Son dispositivos que están constituidos por circuitos con capacitores, resistencias y un elemento que necesita de una fuente de voltaje para funcionar, como un transistor, bulbo o de forma más común un amplificador operacional, a continuación se describen los diferentes tipos de filtros [17].

2.6.9 Filtro pasa bajas.

Este tipo de filtro deja pasar todas las frecuencias desde 0 Hz a la frecuencia de corte y bloquea las frecuencias que están sobre esta, como se puede observar en la ilustración 2.11. A las frecuencias que se ubican entre 0 Hz y hasta la frecuencia de corte se le denomina banda pasante mientras las frecuencias que están encima de la frecuencia de corte se le denomina banda eliminada.

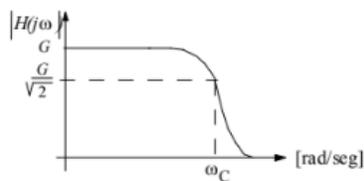


Ilustración 2.11 Gráfica de respuesta de un filtro pasa bajas.

2.6.10 Filtro pasa banda.

Este tipo de filtro, posee dos frecuencias de corte, una inferior y otra superior. La banda pasante se encuentra entre las frecuencias de corte superior e inferior, mientras que las bandas de rechazo se ubican desde 0 a la frecuencia de corte inferior y desde la frecuencia de corte superior hasta el infinito. En la ilustración 2.12 se puede visualizar su comportamiento.

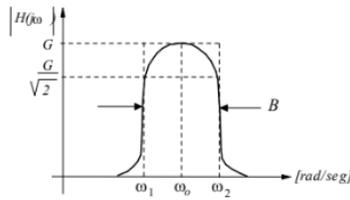


Ilustración 2.12 Gráfica de respuesta de un filtro pasa banda.

2.6.11 Filtro pasa altas.

Este tipo de filtro tiene una banda pasante ubicada entre las frecuencias de corte y el infinito, como se observa en la ilustración 2.13. Su banda de rechazo se ubica por debajo de la frecuencia de corte, hasta el 0.

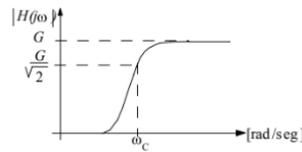


Ilustración 2.13 Gráfica de respuesta de un filtro pasa altas.

2.6.12 Filtro rechaza banda.

Este tipo de filtro posee dos frecuencias de corte, una inferior y otra superior. Para este tipo de filtro, hay dos bandas pasantes, estas se encuentran desde 0 a la frecuencia de corte inferior y la otra desde la frecuencia de corte superior hasta el infinito. En la ilustración 2.14 se observa la respuesta del filtro rechaza banda.

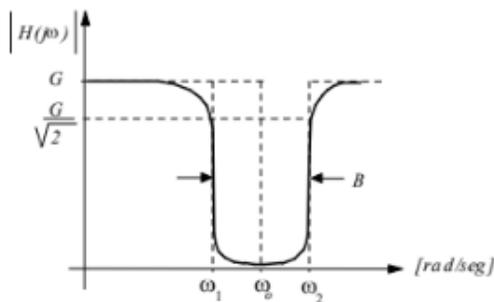


Ilustración 2.14 Gráfica de respuesta de un filtro rechaza banda.

2.6.13 Filtro pasa todo.

El filtro pasa todo transmiten señales de todas las frecuencias. Idealmente estos filtros cubren todo el espectro de frecuencia. Son diseñados para proveer una ganancia constante a todas

las señales a cualquier frecuencia, sin embargo, la relación de fase entre la señal de entrada y la señal de salida varía como una función de la frecuencia [19]. En la ilustración 2.15 se observa el comportamiento ideal del filtro pasa todo.

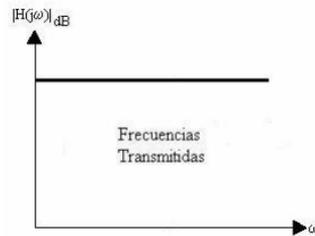


Ilustración 2.15 Representación gráfica de filtro pasa todo ideal.

2.7 Filter Design Tool de Texas Instruments.

Para el desarrollo de los filtros se usó la herramienta Filter Design Tool que proporciona de forma gratuita Texas Instruments para el diseño de filtros analógicos, en la cual se tiene la opción de elegir entre 5 tipos diferentes de filtros: filtro pasa bajas (ilustración 16), filtro pasa banda (ilustración 2.17), filtro pasa altas (ilustración 2.18), filtro elimina banda (ilustración 2.19), filtro pasa todo (ilustración 2.20).

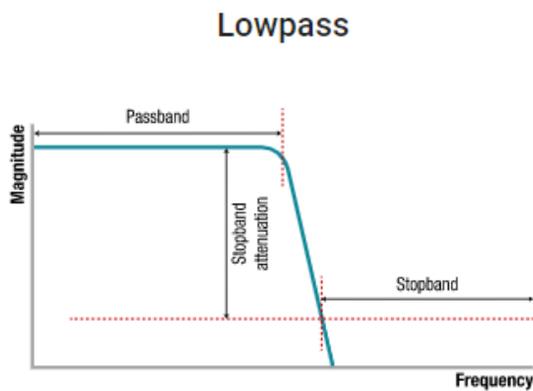


Ilustración 2.16 Filtro pasa bajas.

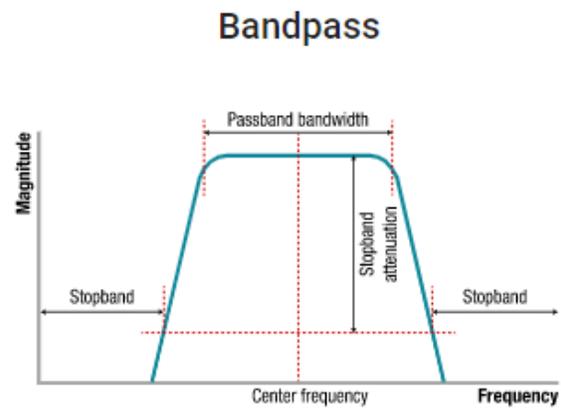


Ilustración 2.17 Filtro pasa banda.

Highpass

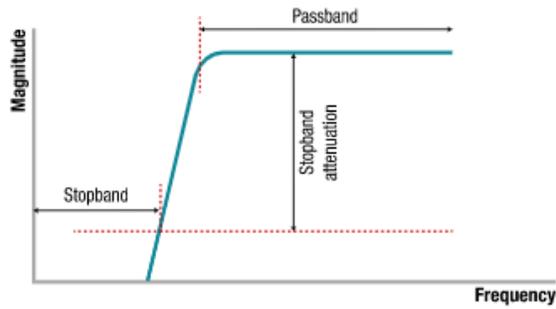


Ilustración 2.18 Filtro pasa altas.

Bandstop

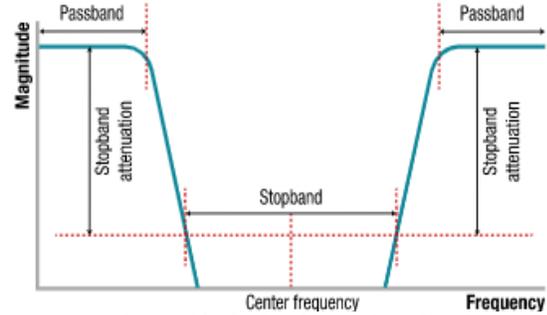


Ilustración 2.19 Filtro rechaza banda.

Allpass

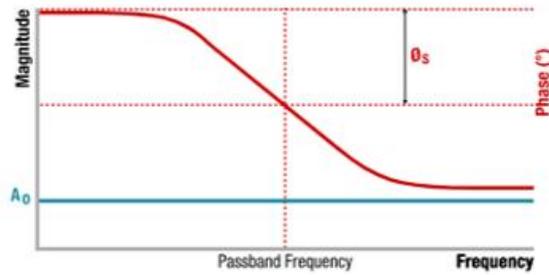


Ilustración 2.20 Filtro pasa todo.

En el módulo de respuesta de filtro (ilustración 2.21), se deciden las características que se requieran del filtro de acuerdo a las necesidades del diseñador.

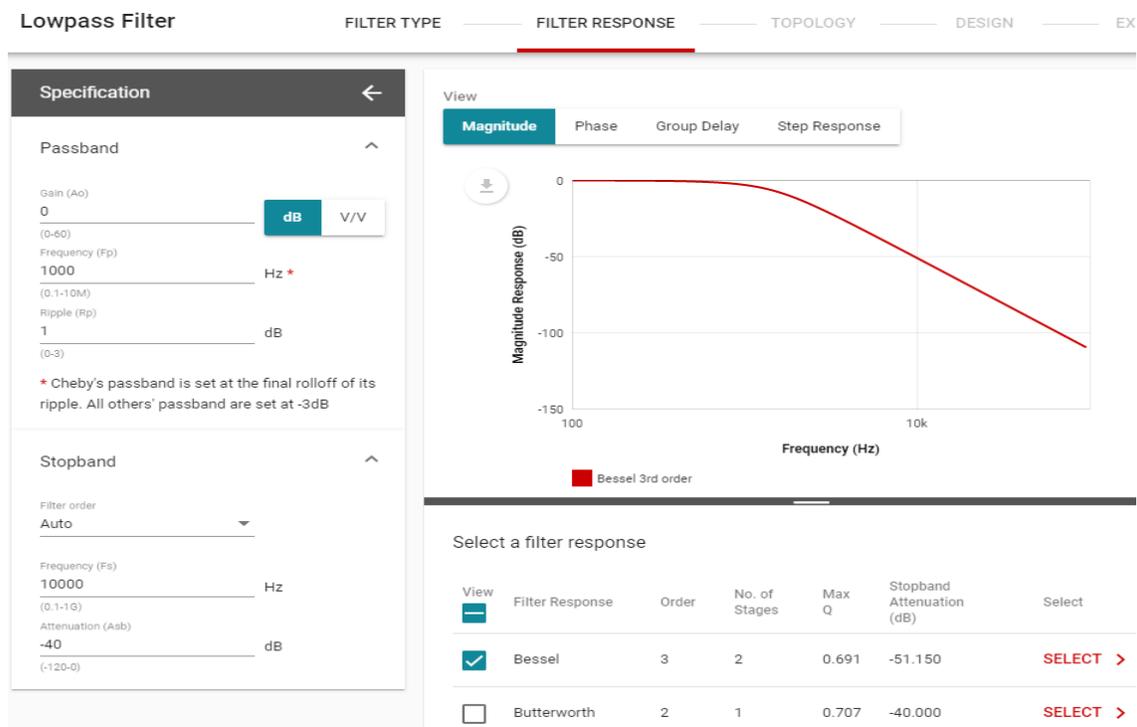


Ilustración 2.21 Módulo: respuesta del filtro.

En las especificaciones (ilustración 2.22) se tiene la opción de elegir las condiciones de la ganancia en decibeles o en voltajes de entrada/salida, Fp es la frecuencia de corte que se requiera para el filtro y Rp son los rizados de la onda, medidos en dB, esta característica solo aplica para los filtros con respuesta Chebyshev.

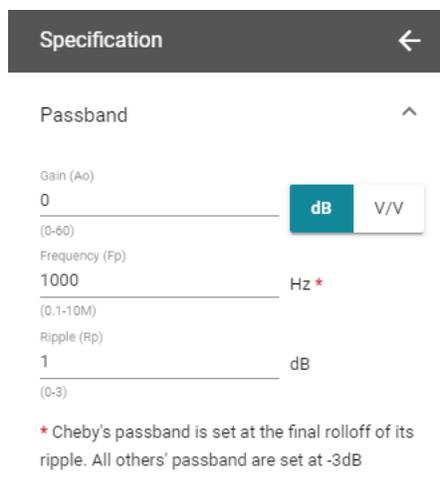


Ilustración 2.22 Especificaciones.

En las características para la frecuencia de paro (ilustración 2.23) se tienen 3 características: el orden del filtro, la frecuencia de paro (Fs) y la atenuación (Asb). Elegir el orden del filtro

bloquea a F_s y A_{sb} porque el programa calcula estos valores de manera automática, si se desea manipular los valores de F_s y A_{sb} se debe de mantener el orden de filtro en modo automático, en este modo calcula el orden del filtro en base a la F_s y A_{sb} y los cambios en la respuesta de la señal se pueden observar en la gráfica de la ilustración 2.24, en donde se podrá observar de que orden es el filtro.

Stopband ^

Filter order
Auto ▼

Frequency (F_s)
10000 Hz
(0.1-1G)

Attenuation (A_{sb})
-40 dB
(-120-0)

Ilustración 2.23 Características de la frecuencia de paro.

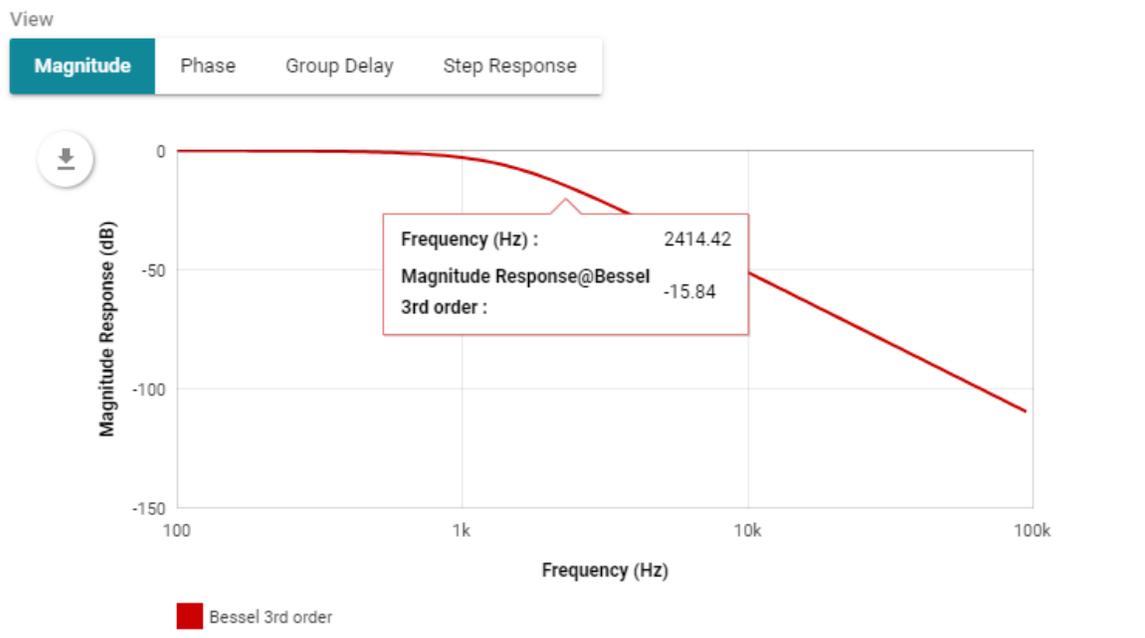


Ilustración 2.24 Gráfica de respuesta.

En la ilustración 2.25 se observa que se puede definir el tipo de respuesta en el filtro y que se pueden ver estos cambios en la gráfica de la ilustración 2.24.

Select a filter response

View	Filter Response	Order	No. of Stages	Max Q	Stopband Attenuation (dB)	Select
<input checked="" type="checkbox"/>	Bessel	3	2	0.691	-51.150	SELECT >
<input type="checkbox"/>	Butterworth	2	1	0.707	-40.000	SELECT >
<input type="checkbox"/>	Chebyshev	3	2	2.018	-66.110	SELECT >
<input type="checkbox"/>	Linear Phase 0.5	3	2	0.954	-56.680	SELECT >
<input type="checkbox"/>	Linear Phase 0.05	3	2	0.803	-54.140	SELECT >
<input type="checkbox"/>	Transitional Gaussian to 6 dB	3	2	0.808	-52.520	SELECT >
<input type="checkbox"/>	Transitional Gaussian to 12 dB	3	2	0.820	-52.870	SELECT >

Ilustración 2.25 Respuestas para el filtro.

En el módulo siguiente (ilustración 2.26) se elige entre dos tipos de topologías para los filtros: Sallen-Key o de retroalimentación múltiple. El programa muestra las características de cada topología (ilustración 2.27).

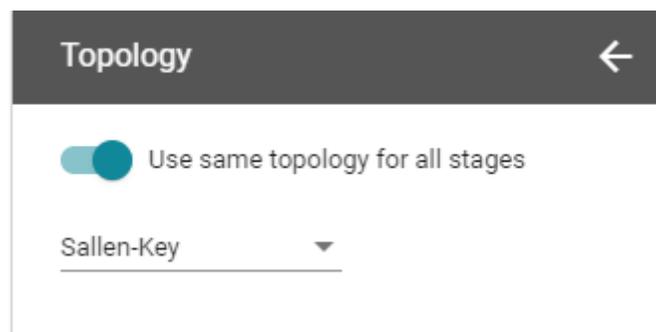


Ilustración 2.26 Topología de los filtros.

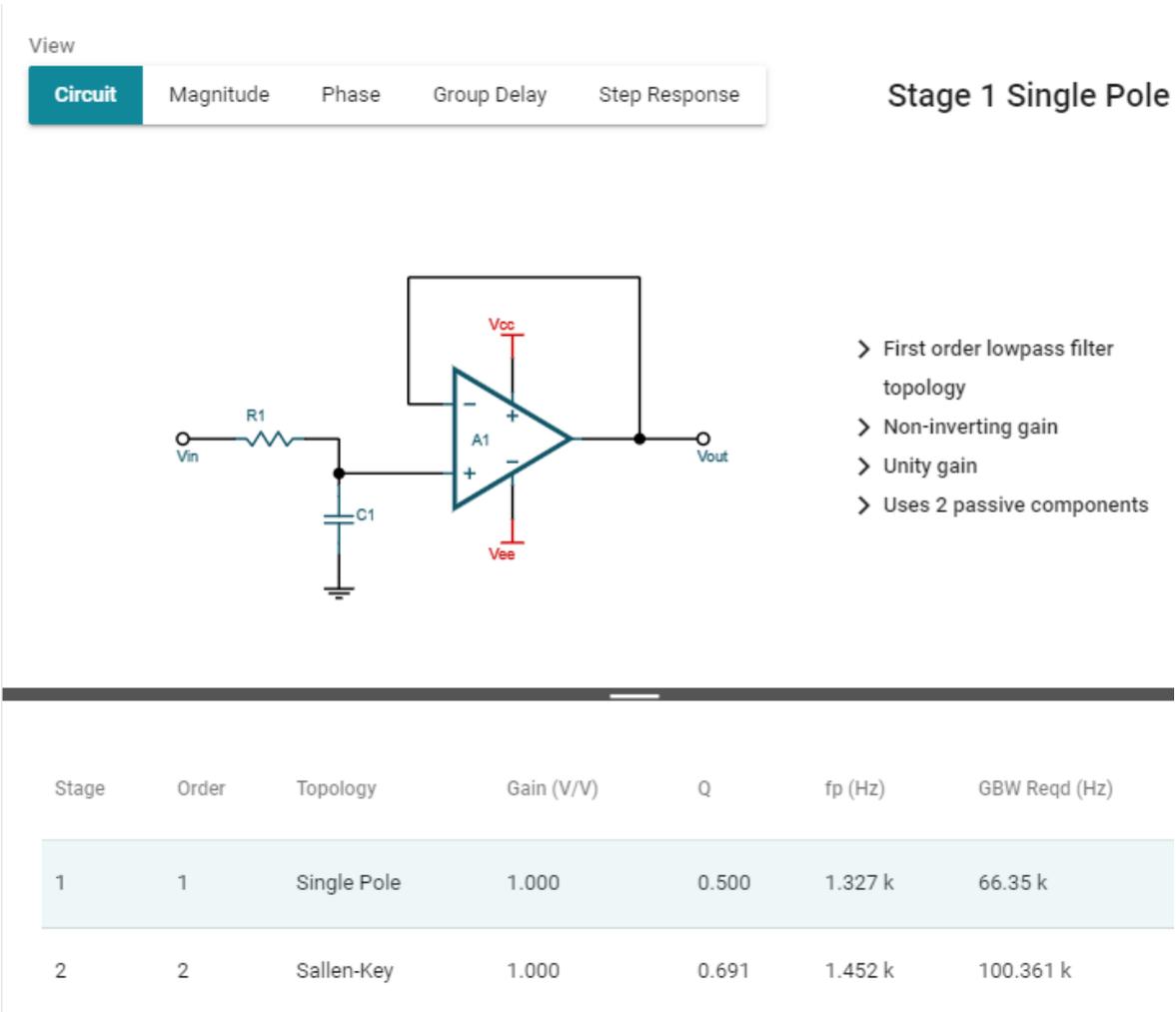


Ilustración 2.27 Características de la topología.

El último módulo se genera el circuito que se necesitará realizar para obtener el comportamiento del filtro deseado (ilustración 2.28), el programa da la opción de elegir las tolerancias que se requieran en las resistencias y capacitores (ilustración 2.29).

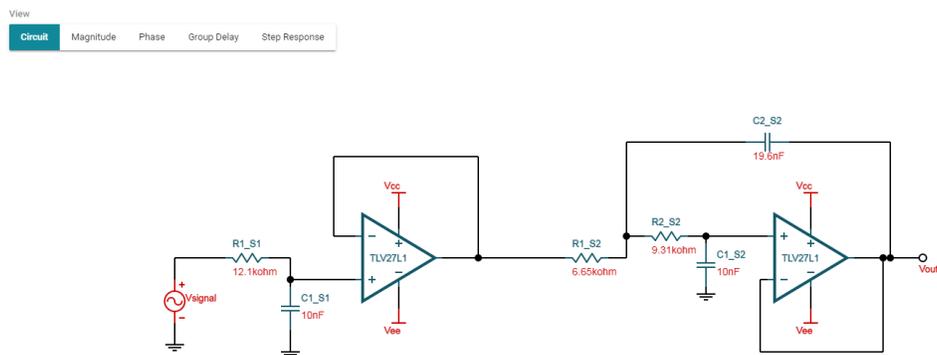


Ilustración 2.28 Circuito generado del filtro.

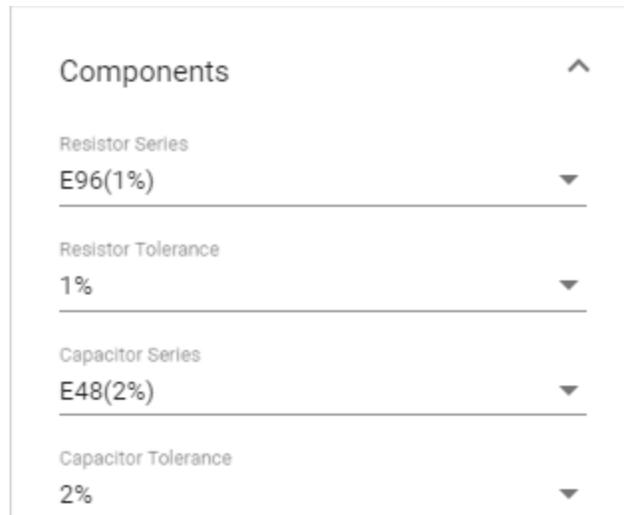


Ilustración 2.29 Tolerancias de resistencias y capacitores.

2.8 Amplificador de potencia

Un amplificador de potencia es un dispositivo que convierte la energía de una fuente de corriente continua en una señal de potencia de salida, la cual se controla utilizando una señal de entrada. Éstos pueden ser de diversas clases como son: clase A, clase B, clase AB y clase C. Cada uno de estos posee características distintas de eficiencia y distorsión, razón por la cual tienen distintas aplicaciones en diversas áreas [20].

2.8.1 Amplificador de clase A.

En esta clase el amplificador se polariza de manera que la corriente por el colector fluya durante un ciclo completo de la señal de entrada. En éste modo, el dispositivo opera por encima de su característica de transferencia lineal. Esta clase proporciona la distorsión de forma de onda más baja, pero también la menor eficiencia, la cual generalmente se encuentra por el orden de 50 %. Estos amplificadores muestran una baja distorsión de intermodulación, lo que los hace muy adecuados para aplicaciones donde la linealidad es de interés primordial.

2.8.2 Amplificador de clase B.

Para la clase B, se hace fluir la corriente del colector durante medio ciclo de la señal. El amplificador se polariza de forma tal que el transistor se active sólo durante la mitad del ciclo entrante, la otra mitad del ciclo se amplifica por otro transistor de modo que en la salida se reconstruye la onda completa Mientras que cada transistor funciona claramente en un modo

no lineal, la onda de entrada total se replica directamente en la salida; por tanto, el amplificador de clase B se clasifica como un amplificador lineal. En este modo, el dispositivo trabaja en las afueras de su característica de transferencia lineal. Esta clase proporciona una mayor eficiencia a expensas de una cierta distorsión de forma de onda.

2.8.3 Amplificador clase C.

La clase C se caracteriza por la elección de un punto de operación en el que la corriente fluye por menos de la mitad del tiempo de la onda de entrada, en otras palabras, el ángulo de conducción es menor a 180° , convirtiéndolo en un amplificador no lineal ya que no replica directamente la señal de entrada. Esto se traduce en una significativa distorsión en la señal amplificada cuya forma de onda son impulsos.

2.8.4 Amplificador de clase AB.

Es una variación de la clase B, la corriente del colector abarca un ciclo menor a 360° pero mayor a 180° . La característica de transferencia para un amplificador que funciona en este modo es entre la clase A y clase B.

2.8.4.1 LM3886.

Es un amplificador operacional de audio de 68 watts de alto rendimiento, clase AB con control de mute. Algunas de sus características eléctricas son [21] :

- ☞ **Voltaje de alimentación:** 18 V – 20 V
- ☞ **Potencia de salida:** 68 W
- ☞ **Atenuación Mute:** 115 dB
- ☞ **Ruido de entrada:** 2 μ V

En la ilustración 2.30 se puede observar la configuración de pines del dispositivo.

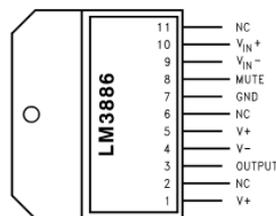


Ilustración 2.30 Encapsulado del LM3886

Este circuito integrado necesita de componentes resistivos y capacitivos calculados en base a las necesidades del circuito para que mantenga un correcto desempeño en el audio, para facilitar los cálculos de cada componente, se utilizó el trabajo de Circuit Basics, sitio web dedicado a proyectos de electrónica y programación. Dicho trabajo se basa en ecuaciones que vienen en la datasheet del dispositivo para crear una guía, en la que explica como calcular la ganancia del amplificador, como lograr un equilibrio en la corriente de entrada, como calcular el capacitor de acople, define los límites de las frecuencias altas y bajas del amplificador y da recomendaciones para tener estabilidad en la red de retroalimentación, además de explicar cómo calcular una red de Zobel [22]. A continuación, se enlistarán cada una de las ecuaciones y sus características.

2.8.5 Ganancia del amplificador.

La ecuación 2.9 sirve para calcular la ganancia necesaria para alcanzar la potencia de salida deseada en base a la impedancia de la bocina y el voltaje de entrada al amplificador.

$$A_v \geq \frac{\sqrt{P \cdot R_L}}{V_{in}} \quad 2.9$$

Donde:

Av= ganancia	P=potencia de salida	R _L = impedancia de la bocina
V _{in} =voltaje de entrada		

En la ilustración 2.31 se muestran dos resistencias, R_{f1} y R_i, las cuales definen la ganancia del amplificador. En la ecuación 2.10 se observa cómo se calcula la resistencia R_{f1} en base a la ganancia y a un valor predeterminado de R_i de 1 KΩ. Circuit Basics recomienda mantener una ganancia entre 27 dB y 30 dB para tener un amplio rango de volumen sin distorsión.

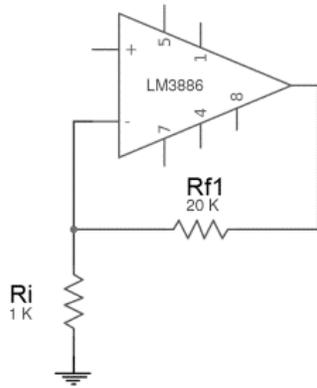


Ilustración 2.31 Resistencias que definen la ganancia.

$$R_{f1} = R_i(A_v - 1) \quad 2.10$$

Donde:

R_{f1} = resistencia en ohms de R_{f1}	R_i = 1 K Ω	A_v = ganancia
--	----------------------	------------------

2.8.6 Equilibrio de la corriente.

Si la corriente en la entrada no inversora y en la entrada inversora son diferentes, se puede producir una diferencia de voltajes entre ellas, el cual causaría ruido en la señal de salida, por lo tanto, en la entrada no inversora se agregan dos resistencias, R_b y R_{in} , las cuales al sumarse deben aproximarse al valor de R_{f1} , en la ilustración 2.32 se pueden observar.

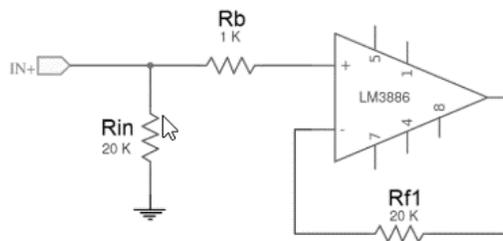


Ilustración 2.32 Resistencias para equilibrar la corriente.

2.8.7 Capacitor de acople.

El capacitor de acople C_{in} (ilustración 2.33) limita las frecuencias altas y su valor se calcula con la ecuación 2.11, en la que se puede observar que la frecuencia de corte y el valor de R_{in} define su valor.

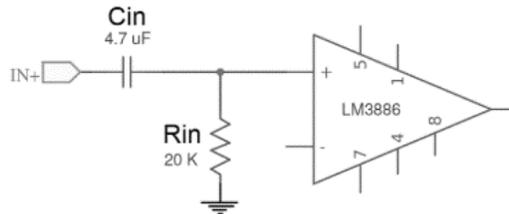


Ilustración 2.33 Capacitor de acople.

$$C_{in} = \frac{1}{2\pi R_{in} F_c} \quad 2.11$$

C_{in} = capacitancia en faradios de C_{in}	R_{in} = resistencias en ohms de R_{in}	F_c = frecuencia de corte
--	--	-----------------------------

2.8.8 Límite de frecuencias bajas en la red de retroalimentación.

Para limitar las frecuencias bajas en la red de retroalimentación se agrega un capacitor C_i (ilustración 2.34) el cual debe contar con una frecuencia de corte de 3 a 5 veces más baja que la de C_{in} para que no pasen frecuencias bajas que no pueda manejar el bucle de retroalimentación, porque si estas frecuencias pasan, lo que ocasionaría es que haya una distorsión por diferencias de voltaje. En la ecuación 2.12 se observa cómo se calcula el valor de C_i .

$$C_i = \frac{\sqrt{2} * (R_{in} + R_b) * C_{in}}{R_i} \quad 2.12$$

Para ajustar el valor de capacitancia de C_i correctamente, se utiliza la ecuación 2.13 con la que se calcula la frecuencia de corte en base al valor de C_i , esta ecuación ayuda aproximarse a valores de capacitancias comerciales y a mantener esta frecuencia de corte dentro de las características antes mencionadas.

$$F_c = \frac{1}{2\pi R_i C_i} \quad 2.13$$

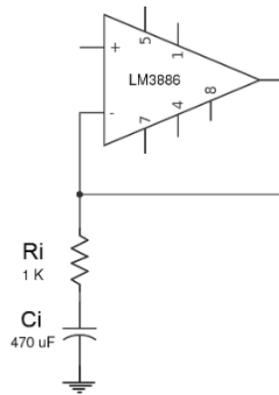


Ilustración 2.34 Capacitor pasa bajas del bucle de retroalimentación.

2.8.9 Límite de frecuencias altas en el amplificador.

El capacitor C_c (ilustración 2.35) con la resistencia R_b forman un filtro pasa bajas, este establecerá el límite superior del ancho de banda del amplificador. En este caso “Circuit Basics” recomienda usar un capacitor de 680 pF, este valor establece una frecuencia de corte de 234 KHz, el cual ayuda a reducir las interferencias electromagnéticas.

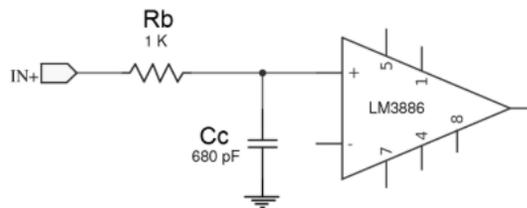


Ilustración 2.35 Capacitor pasa bajas de la entrada no inversora.

2.8.10 Componentes de estabilidad en la red de retroalimentación.

Para amortiguar la resonancia en el circuito de retroalimentación y mejorar la estabilidad se agrega una resistencia R_{f2} y un capacitor C_f (ilustración 2.36), los valores que recomienda usar “Circuit Basics” son los proporcionados por la datasheet, $C_f= 50$ pf y $R_{f2}= 20$ k Ω .

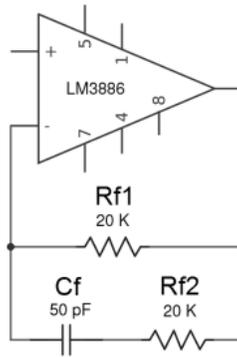


Ilustración 2.36 Capacitor C_f y resistencia R_{f2} .

2.8.11 Red de Zobel.

La red Zobel (ilustración 2.37) se usa para evitar oscilaciones causadas por cargas inductivas y para evitar que las frecuencias de radio captadas por los cables de los altavoces vuelvan a la entrada inversora del amplificador a través del circuito de retroalimentación. Para esto se tiene que calcular una frecuencia de corte que evite que las frecuencias de radio, pero que al mismo tiempo sea igual o mayor al límite de frecuencia que puede distinguir el oído humano, para esto se utiliza la ecuación 2.14.

$$F_c = \frac{1}{2\pi R_{sn} C_{sn}} \quad 2.14$$

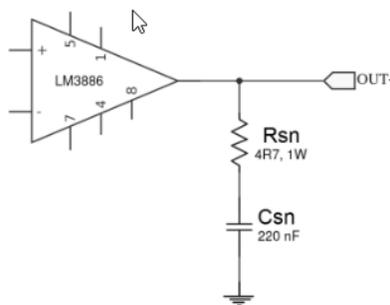


Ilustración 2.37 Red de Zobel.

2.8.12 Control de mute.

El LM3886 posee un pin de mute o silencio, el cual al activarse silencia el sonido. La datasheet del dispositivo explica que, para desactivar esta función, la corriente que circula por el pin ocho debe ser igual o mayor a 0.5 mA y para cumplir con esta condición el fabricante facilita una formula (ecuación 2.15) con la que se calcula la resistencia que debe haber en el pin ocho para que circule la corriente deseada.

$$R_m \leq \frac{|-V_{cc}| - 2.6V}{5 \text{ mA}} \quad 2.15$$

2.9 Sistemas.

Un sistema se puede considerar como cualquier elemento, aparato, proceso que transforma una señal a la entrada en otra señal a la salida. Los procesos pueden tener una o varias entradas, y una o varias salidas. El sistema se puede representar por un diagrama de bloques (ilustración 2.37) que representa la transformación que se efectúa sobre la señal de entrada [23].

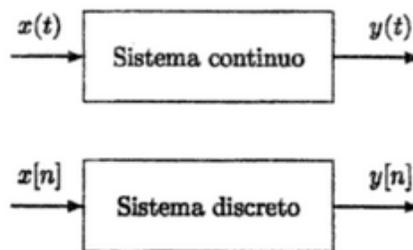


Ilustración 2.38 Diagrama de bloques de un sistema continuo y un sistema discreto.

2.9.1 Sistemas de control.

Se denomina sistema de control aquel sistema constituido por un conjunto de elementos conectados de forma que permiten regular o gobernar otro sistema, denominado planta o proceso. Los principales elementos de un sistema de control se enlistan a continuación: [24]

- ☞ **Planta $G(s)$:** Son los componentes del sistema que hay que controlar.
- ☞ **Controlador $G_c(s)$:** Proporciona la excitación al proceso para alcanzar la salida deseada.

- ☞ **Sensor** $H(s)$. Es el elemento que permite obtener una medición de la salida de la planta.
- ☞ **Actuador**. Es la parte del proceso que provoca físicamente la dinámica de todo el sistema
- ☞ **Transmisor**. Es la parte del sistema encargada de recoger la señal del sensor, acondicionarla y compararla con la señal de consigna para producir una señal de error que significará la entrada al regulador.

Dentro de los sistemas de control existen dos principales clasificaciones (sistemas de control de lazo abierto y sistemas de control de lazo cerrado) mismas que serán mencionadas a continuación. Igualmente se dará una breve descripción de los sistemas de control digital.

2.9.2 Sistema de control de lazo abierto

Es aquel esquema de control en el que la salida del proceso a controlar no afecta a la acción de control, por lo que el control en lazo abierto es muy sensible a perturbaciones y variaciones. Requiere un conocimiento preciso del proceso a controlar y la garantía del correcto funcionamiento del controlador, que no tiene acceso a la salida de proceso. En la ilustración 2.39 puede observarse un diagrama de bloques simple representativo de este tipo de control.

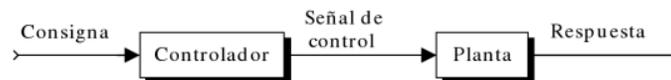


Ilustración 2.39 Diagrama de bloques de un sistema de control de lazo abierto.

2.9.3 Sistema de control de lazo cerrado

El control en lazo cerrado, realimentado o feedback puede definirse como el uso de una diferencia de señales, determinada al comparar el valor real de la variable de proceso y el deseado, como medio para controlar un sistema. La salida del proceso es utilizada para regular la amplitud de su entrada, razón por la que se denomina sistema de control en lazo cerrado. En la ilustración 2.40 puede ser observado un diagrama de bloques de un sistema de control de lazo cerrado.

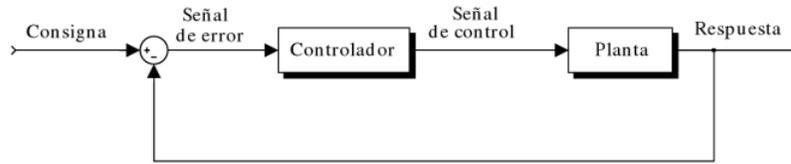


Ilustración 2.40 Diagrama de bloques de un sistema de control de lazo cerrado.

2.9.4 Sistema de control digital

En este sistema de control, la computadora realiza directamente la adquisición de información, ejecución de las órdenes de control y de su transmisión a los elementos finales de control (actuadores). La computadora es el cerebro del bucle de control, efectúa la comparación con los puntos de consigna e introduce la señal de error en el programa correspondiente, enviando las señales de salida a los actuadores digitales.

El computador procesa señales en forma numérica y discreta en el tiempo. En la ilustración 2.41 se muestra un diagrama de bloques de control digital.

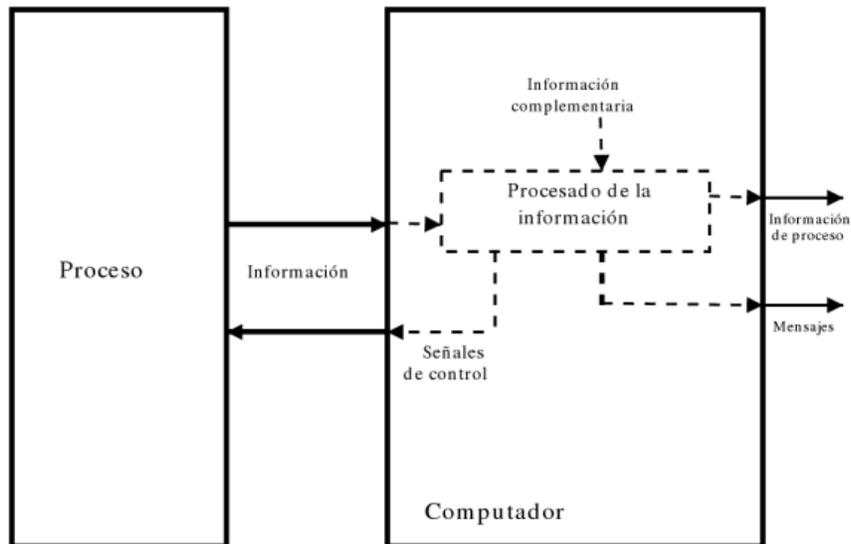


Ilustración 2.41 Diagrama de bloques de un sistema de control digital.

2.10 Microcontroladores

Un microcontrolador (ilustración 2.42) es un chip o circuito integrado que incluye un microprocesador, memoria (RAM, ROM, EEPROM, etc.) y unidades de entrada/salida (puertos paralelo, temporizadores, comparadores, convertidores A/D, puertos serie, etc.)

[25]. Este dispositivo, al ser programable es utilizado en múltiples aplicaciones y áreas de la electrónica.

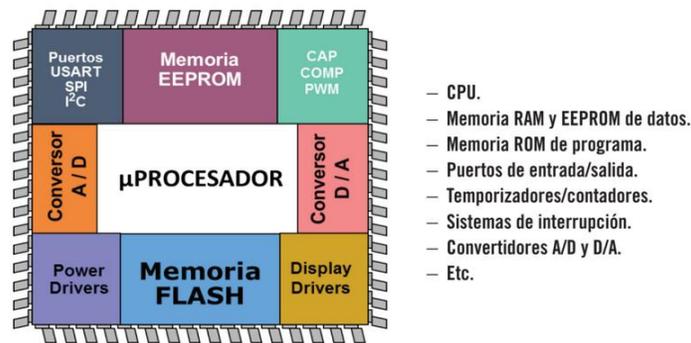


Ilustración 2.42 Esquema de un microcontrolador.

2.10.1 Microprocesadores

Es el componente electrónico encargado de la ejecución de programas, operando con los datos que recibe de la memoria, los dispositivos de entrada/salida y periféricos. Se le suele denominar CPU (del inglés central process unit) o unidad central de proceso. Está compuesto de cuatro elementos principales:

- ☞ **La unidad aritmético-lógica:** realiza todas las operaciones matemáticas.
- ☞ **La unidad de control:** dirige y coordina todos los elementos del procesador.
- ☞ **Los registros:** áreas de almacenamiento temporal que contienen datos o instrucciones.
- ☞ **Buses internos:** red de líneas por donde circulan los datos e instrucciones.

2.11 Arduino

Arduino es una plataforma de hardware libre diseñada principalmente con una electrónica basada en una placa, un microcontrolador y un entorno de desarrollo que permite a cualquier persona implementar cualquier tipo de proyecto multidisciplinar. Puede ser utilizada para diseñar y fabricar dispositivos, de tamaño y de coste muy reducidos, con amplias posibilidades de conectividad y ampliación [26]. El logotipo de Arduino es el que se muestra en la ilustración 2.43.



Ilustración 2.43 Logotipo de Arduino.

El chip utilizado en la placa hardware de Arduino es el ATmega. Los ATmega pertenecen a la familia AVR, que son una serie de microcontroladores de arquitectura RISC del fabricante Atmel. Los microcontroladores de Atmel (ilustración 2.44) más utilizados con las placas Arduino son el ATmega168, ATmega328, ATmega1280 y ATmega8 por su sencillez y bajo coste, permitiendo a su vez el desarrollo fácil de múltiples diseños.

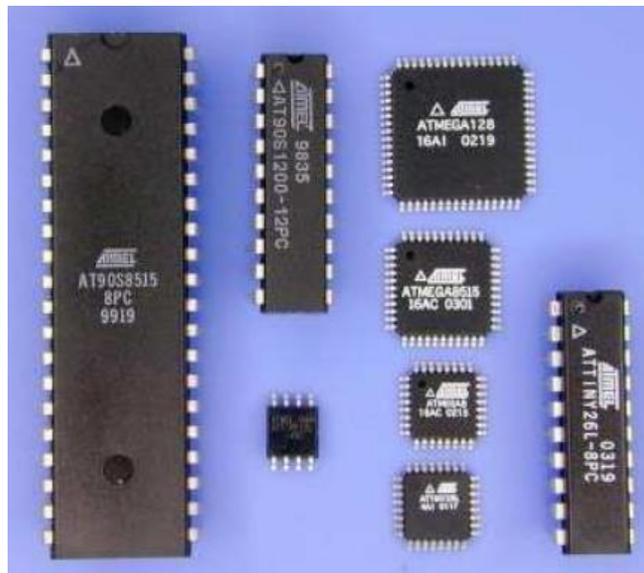


Ilustración 2.44 Microcontroladores Atmel de la familia AVR.

2.11.1 Arduino Mega 2560

El Arduino Mega 2560 es una tarjeta de desarrollo basada en el ATmega2560 tiene 54 pines digitales de entrada/salida de los cuales 15 pueden ser utilizados como salida PWM (modulación por amplitud de pulsos), también cuenta con 16 entradas analógicas, 4 UARTs (puertos de comunicación serial), un oscilador de cristal de 16 MHz, una conexión USB, una entrada de alimentación por jack, un encabezado ICSP, y un botón de reinicio (ilustración 2.45) [27]. Es importante aclarar, que en el presente desarrollo Arduino Mega 2560 fue la placa utilizada.



Ilustración 2.45 Arduino Mega 2560

2.11.2 IDE de Arduino

Las siglas IDE vienen de Integrated Development Environment, lo que traducido al español significa Entorno de Desarrollo Integrado. Esto es simplemente una forma de llamar al conjunto de herramientas a nivel software que permite a los programadores desarrollar sus propios programas con comodidad. En el caso de Arduino, se necesita un IDE que permita escribir y editar el código (también conocido como “sketch”) mediante un constructor de interfaz gráfica (GUI), que adicionalmente indique al usuario si se cometió algún error, por ejemplo, de sintaxis, y una vez que el código compile, grabarlo en la memoria del microcontrolador de la placa para que este se convierta a partir de entonces en el ejecutor autónomo de dicho programa [28].

Arduino IDE es una opción multiplataforma que no sólo permite trabajar en Windows, sino que también considera procedimientos para instalar sobre Mac OSX y GNU/LINUX [29]. En la ilustración 2.46 se muestra la interfaz principal de Arduino IDE.

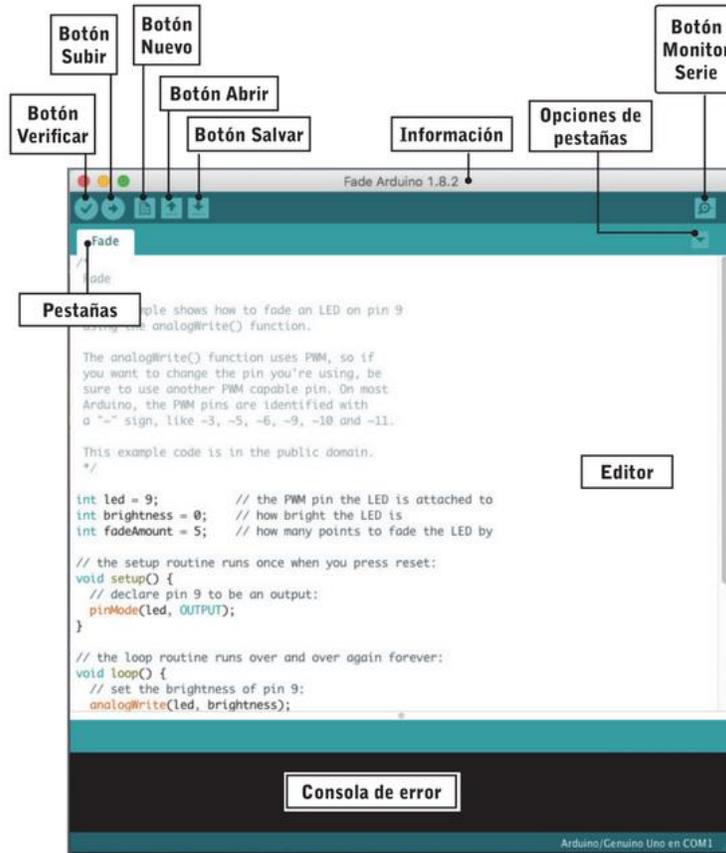


Ilustración 2.46 Interfaz principal de Arduino IDE.

2.11.3 Bibliotecas de Arduino

Las bibliotecas son códigos auxiliares que forman parte del programa general y que a su vez ayudan a controlar dispositivos como sensores, motores, pantallas LCD, entre otros, o la manipulación de datos, mediante el uso de funciones propias de cada biblioteca, con la finalidad de simplificar el código de todo el programa y lograr una mejor administración del mismo. Durante el desarrollo de este proyecto únicamente fueron empleadas dos bibliotecas, mismas que serán explicadas a continuación.

2.11.3.1 Biblioteca LiquidCrystal

Con esta biblioteca, que se encuentra integrada dentro de la IDE de Arduino automáticamente, la tarjeta de desarrollo puede gestionar la información que se necesite representar en pantallas LCD que funcionen con el chip Hitachi HD44780 o alguno compatible, los cuales son encontrados en la mayoría de LCDs basados en texto. La

biblioteca funciona ya sea con 4 u 8 líneas de datos en adición con el resto de los pines de control de los que disponga la pantalla [30]. De esta manera se pueden colocar símbolos en partes específicas de la pantalla con la utilización de funciones específicas de las que dispone esta biblioteca.

Estas son algunas de las funciones que son parte de la biblioteca LiquidCrystal:

- ☞ **LiquidCrystal:** Sirve para indicar qué pin del Arduino será conectado a determinado pin de control de la pantalla. Se debe respetar el orden de pines establecido por la biblioteca. La información a detalle se encuentra en:
<https://www.arduino.cc/en/Reference/LiquidCrystalConstructor>
- ☞ **Begin (columnas, filas):** En esta función se especifica la cantidad de filas y columnas de la pantalla.
- ☞ **Clear ():** Borra la pantalla y pone el cursor en posición inicial.
- ☞ **setCursor(columna, fila):** Coloca el cursor en la columna y fila especificados en los paréntesis.
- ☞ **print(valor):** Imprime una variable o un texto en la pantalla

Al final de cada función, cuando se cierra el paréntesis, se debe colocar un punto y coma (;) de lo contrario al compilar el programa, aparecerá un error de sintaxis en la consola.

Todas las funciones disponibles para esta biblioteca se encuentran en:

<https://www.arduino.cc/en/Reference/LiquidCrystal>

2.11.3.2 Biblioteca DigiPotx9Cxxx

Esta biblioteca, creada por Timo Fager, es de gran utilidad cuando se requiere trabajar con potenciómetros digitales de la familia X9Cxxx, los cuales serán explicados más adelante, ya solo se deben conectar los pines de control del potenciómetro a 3 pines digitales de la tarjeta de desarrollo y mediante funciones simples poder variar el valor resistivo. La biblioteca no se encuentra integrada dentro de la IDE de Arduino por lo que debe ser descargada del siguiente enlace:

<https://sites.google.com/site/tfagerscode/home/digipotx9cxxx>

Una vez integrada al entorno de programación ahora puede ser utilizada. Estas son algunas de las instrucciones que posee la biblioteca:

- ☞ **DigiPot ()**: Sirve para indicar qué pin del Arduino será conectado a determinado pin de control del potenciómetro.
- ☞ **increase ()**: Sirve para incrementar el valor resistivo del potenciómetro, insertando un número de 8 bits dentro de los paréntesis en un rango que va del 0 al 99.
- ☞ **decrease()**: Sirve para disminuir el valor resistivo del potenciómetro, insertando un número de 8 bits dentro de los paréntesis en un rango que va del 0 al 99.
- ☞ **set()**: Coloca el potenciómetro en determinada posición, insertando un número de 8 bits dentro de los paréntesis en un rango que va del 0 al 99.

Otras funciones disponibles para esta biblioteca y más especificaciones de esta biblioteca pueden ser vistas en el siguiente repositorio de GitHub:

<https://github.com/calentadorsolarpasoapaso/ControlACPotenciometro/blob/master/DigiPotX9Cxxx.h>

2.12 Resistores

Uno de los componentes eléctricos-electrónicos más comunes y fiables es la resistencia. Sus misiones más importantes son el control de la corriente y la división del voltaje. Las resistencias se fabrican en una amplia gama de valores. Pueden encontrarse resistencias desde menos de 1 Ω a por encima de 100 M Ω [31].

Atendiendo a la forma en la que la resistencia va a ser aplicada, se pueden clasificar en tres diferentes grupos: fijas, ajustables y variables [32].

2.12.1 Resistencias fijas

El valor óhmico de la resistencia se mantiene constante en la aplicación. No puede ser variado a voluntad. En la ilustración 2.47 se pueden observar diferentes estilos de resistencias fijas.

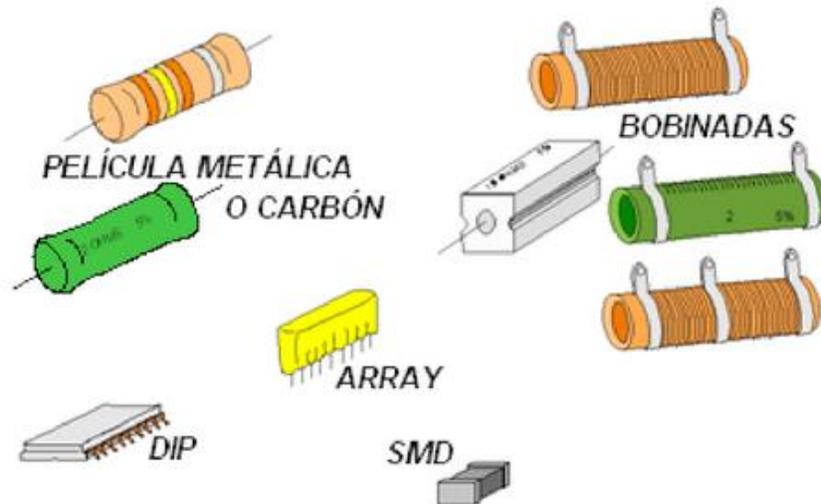


Ilustración 2.47 Resistencia fijas.

2.12.2 Resistencias ajustables

Se establece un valor óhmico determinado en un momento dado y a partir de ese momento se considera a todos los efectos como una resistencia fija. Esta forma de aplicación se da en todos aquellos casos en los que el circuito necesita el ajuste de algún parámetro eléctrico mediante la variación del valor óhmico de una resistencia para su correcto funcionamiento. Estas resistencias suelen ir soldadas en las placas de circuito impreso, o en algún lugar interno del equipo no accesible durante el funcionamiento normal del mismo. En muchos casos, una vez realizado el ajuste, la resistencia se sella mediante una resina para evitar que accidentalmente cambie su valor.

2.12.3 Resistencias variables

El valor óhmico puede ser variado en cualquier momento bajo requerimientos de funcionalidad. A diferencia de la anterior, estas resistencias son accesibles desde el exterior del equipo y son variadas a voluntad por el usuario de este en condiciones cotidianas de funcionamiento, buscando una condición concreta de trabajo del mismo. Se debe tener en cuenta que el componente físico puede ser el mismo a la hora de actuar como resistencia ajustable o variable. En la ilustración 2.48 se muestran diferentes resistencias variables y ajustables. Algunas resistencias variables también pueden ser conocidas como potenciómetros.

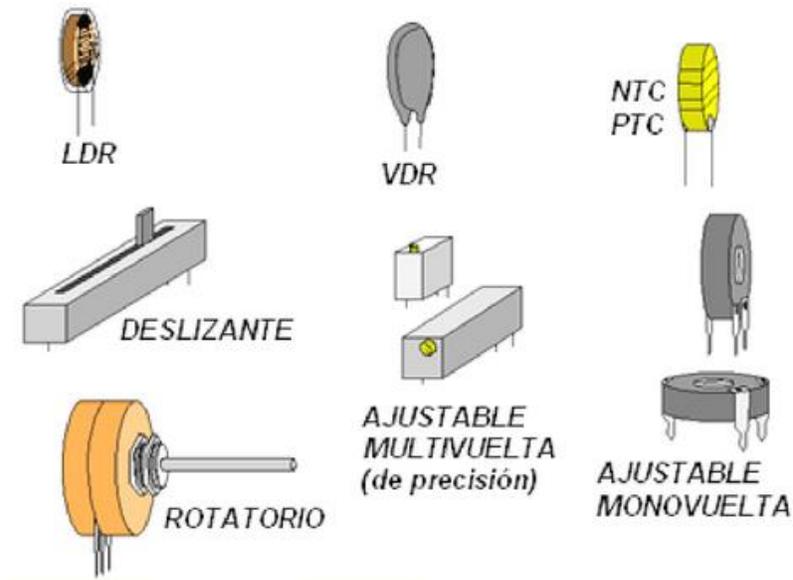


Ilustración 2.48 Resistencias ajustables y variables.

2.12.4 Potenciómetros

En la ilustración 2.49 se representa la forma constructiva de un potenciómetro. En ella se aprecia como un contacto metálico móvil accionado desde el exterior del componente puede girar sobre una superficie resistiva. Este contacto móvil está conectado al cursor del potenciómetro. Según la posición del cursor respecto a los extremos de la superficie resistiva donde están los contactos metálicos fijos tendremos más o menos resistencia entre el cursor (también llamado wiper) y el contacto metálico correspondiente. Se debe tener en cuenta que la resistencia entre los contactos metálicos fijos es siempre la misma (a menos que unamos el cursor con uno de los dos contactos) conocida como la resistencia nominal del potenciómetro.

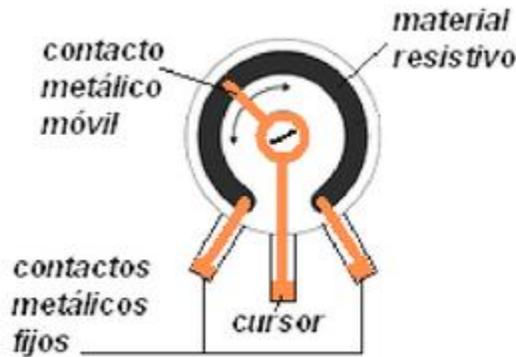


Ilustración 2.49 Interior de un potenciómetro

2.12.5 Potenciómetros digitales

En muchos equipos de última generación, que hacen uso de la tecnología digital, los potenciómetros tradicionales están siendo reemplazados por el potenciómetro digital. Ellos no tienen partes móviles. La resistencia presentada entre sus terminales depende de los pines de control a través de programación digital aplicada. Una ventaja sobre los potenciómetros tradicionales es la ausencia de contacto eléctrico lo que los hace virtualmente a prueba de fallos y desgaste [33].

Los potenciómetros digitales se pueden encontrar con diferentes protocolos de comunicación para ser controlados, por ejemplo, I2C, SPI, CS, U/D. Algunos de ellos cuentan con memoria EEPROM para almacenar el valor inicial de la resistencia variable [34].

En el presente desarrollo, uno de los objetivos es ecualizar la guitarra de manera inalámbrica a través de un teléfono inteligente, lo anterior implica la utilización de entornos digitales, razón por la cual se requirió el manejo de potenciómetros digitales. El chip seleccionado para tal objetivo es el X9C103S por su rápida adquisición en el mercado.

2.12.6 Potenciómetro digital X9C103S

El potenciómetro digital es fabricado por la empresa Renesas, en su matrícula, el usuario puede saber cuál es la resistencia nominal del potenciómetro, para este caso (X9C103S) el 103 de la matrícula quiere decir que la resistencia es de $10^3 = 10 \text{ k}\Omega$. En el mercado también pueden encontrarse los modelos X9C102, X9C104, X9C503 los cuales tienen una resistencia nominal de $1 \text{ k}\Omega$, $100 \text{ k}\Omega$ y $50 \text{ k}\Omega$ respectivamente.

El dispositivo consiste en un arreglo de 99 elementos resistivos, un conmutador (wiper) que puede ubicarse en diferentes áreas dentro del arreglo de resistencias, una sección de control y una memoria no volátil, para que el dispositivo pueda posicionarse en un valor inicial al energizarse. La posición del wiper es controlada por una interfaz de tres pines que son: CS (chip select), U/D (up/down) e INC (increment) [35].

Algunas de sus principales características son:

- ☞ Potenciómetro de estado sólido
- ☞ Interfaz Serial de 3 cables (Three-Wire Serial Interface)
- ☞ 100 puntos de acceso para el wiper
- ☞ 99 elementos resistivos
- ☞ Voltaje de operación en el arreglo de resistencias: $\pm 5V$
- ☞ Bajo consumo: $V_{CC} = 5V$, Corriente activa 3mA max, Corriente de Standby, 750 μA
- ☞ Alta fiabilidad: Retención de información por hasta 100 años
- ☞ Encapsulado de 8 pines

En la ilustración 2.50 se muestra la configuración de los pines del encapsulado, en la tabla 1 se da una descripción de la función de cada pin. Así mismo en la ilustración 2.51 se proporciona un diagrama de bloques del dispositivo

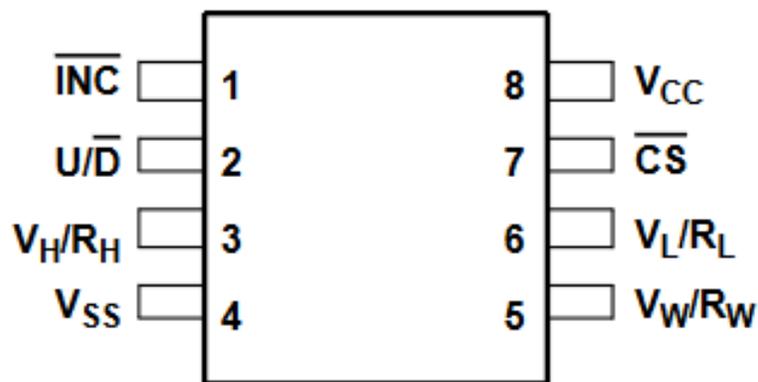


Ilustración 2.50 Configuración de pines del potenciómetro digital.

Tabla 2-1 Descripción de los pines del potenciómetro digital.

# de pin	Símbolo	Descripción
1	INC	Es una entrada que se activa por flancos de bajada, mueve al conmutador (wiper) y aumenta o decrementa el contador dependiendo del estado lógico de la entrada en U/D.
2	U/D	Controla la dirección del wiper y si el contador es incrementado o decrementado.
3	VH/RH	Es equivalente a 1 de los 2 extremos en un potenciómetro tradicional (ya sea el izquierdo o derecho). El voltaje mínimo tolerado es de -5V y el voltaje máximo es de +5V.
4	Vss	Tierra (GND)
5	VW/HW	Es el equivalente a la terminal móvil de un potenciómetro tradicional. Su posición dentro del arreglo de resistencias es determinada por los pines de control.
6	VL/HL	Es equivalente a 1 de los 2 extremos en un potenciómetro tradicional (ya sea el izquierdo o derecho). El voltaje mínimo tolerado es de -5V y el voltaje máximo es de +5V.
7	CS	Es el encargado de activar el dispositivo al encontrarse en estado bajo. El actual valor del contador se almacena en la memoria cuando CS es regresado a estado alto e INC también este en alto. Al terminar se activa el estado standby de ahorro de energía
8	Vcc	+Vcc

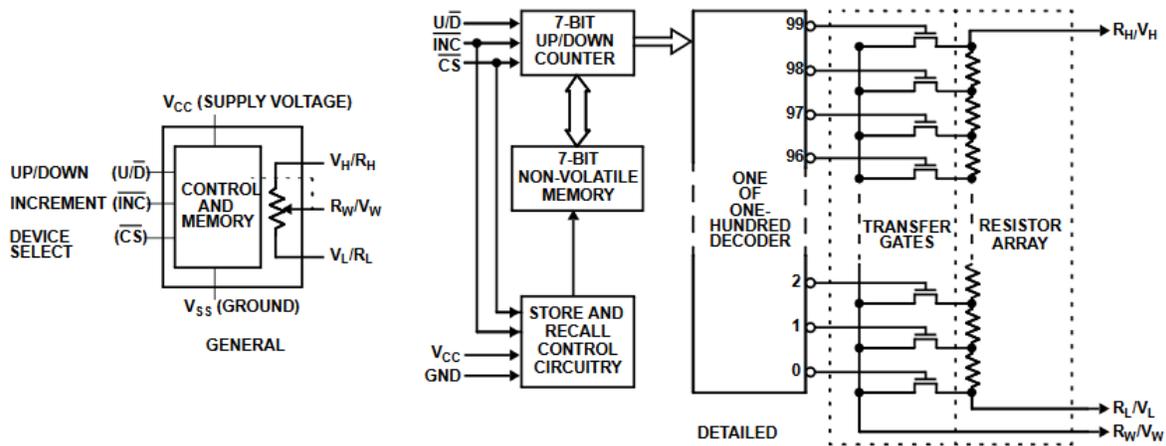


Ilustración 2.51 Diagrama de bloques del potenciómetro digital

El control de este dispositivo se efectúa mediante transiciones en los pulsos eléctricos presentes en los pines de control, como puede verse en la ilustración 2.52. Sin embargo, la biblioteca DigiPotX9Cxxx ya mencionada, permite controlar la posición del wiper mediante pasos. El chip utilizado cuenta con un valor nominal de $10\text{ k}\Omega$ y al estar constituido por un arreglo de 99 resistencias, un paso equivale a $\frac{10000}{99} \approx 101\ \Omega$.

CS	INC	U/D	MODE
L		H	Wiper Up
L		L	Wiper Down
	H	X	Store Wiper Position
H	X	X	Standby Current
	L	X	No Store, Return to Standby
	L	H	Wiper Up (not recommended)
	L	L	Wiper Down (not recommended)

Ilustración 2.52 Funciones del potenciómetro digital.

2.13 Pantalla LCD

Las pantallas alfanuméricas se utilizan en una amplia gama de aplicaciones, como computadoras de bolsillo, procesadores de texto, fotocopiadoras, terminales de punto de venta, instrumentos médicos, teléfonos celulares, etc. La pantalla de matriz de puntos alfanumérica de 16×2 (ilustración 2.53) es capaz de mostrar 224 caracteres y símbolos

diferentes [36]. En la hoja de especificaciones proporcionada por el fabricante se puede obtener la lista de los diferentes símbolos que pueden ser representados gráficamente por esta pantalla. En la tabla 2 se indica la distribución de los pines de la pantalla.

En este proyecto, la pantalla se utilizó para mostrar el estado actual de las variables del amplificador.



Ilustración 2.53 Pantalla LCD de 16x2.

Tabla 2-2 Configuración de pines de la pantalla LCD

Número de pin	Símbolo	Función
1	Vss	Tierra (GND)
2	VDD	Suministro de voltaje +5V
3	Vo	Ajuste de contraste
4	RS	Registro de selección entre comandos y datos
5	RW	Escritura o lectura de datos
6	E	Sincronización de lectura de datos
7-14	D0-D7	Líneas de datos
15	A	Ánodo de LED de fondo (+5V)
16	K	Cátodo de LED de fondo (GND)

2.14 Módulo Bluetooth

Para la conexión inalámbrica, se decidió utilizar un enlace Bluetooth ya que el amplificador fue pensado para ensayos o eventos pequeños, por lo que no es necesario cubrir una extensa área de conexión.

El módulo Bluetooth HC-05 (ilustración 2.54) consta de 6 pines, puede actuar como maestro (genera peticiones de conexión) o como esclavo (recibe peticiones de conexión) y acepta un mayor número de órdenes de configuración. Es un módulo sencillo e ideal para pequeños proyectos donde se busca una comunicación fácil entre dos o más dispositivos. En el modo maestro puede conectarse con otros módulos Bluetooth, mientras que en el modo esclavo queda a la espera de peticiones de conexión [37].



Ilustración 2.54 Módulo Bluetooth HC-05.

Características del dispositivo:

- ☞ **Voltaje de operación:** 3.6 V – 6 V
- ☞ **Chip:** BC417143
- ☞ **Potencia de transmisión:** 4dBm, Clase 2
- ☞ **Baud rate soportado:** 1200, 2400, 4800, 9600, 19200, 38400, 57600, 115200.
- ☞ **Velocidad asíncrona:** 2.1Mbps (Max) /160 kbps
- ☞ **Velocidad síncrona:** 1Mbps/1Mbps
- ☞ **Protocolo Bluetooth:** Bluetooth Especificación v2.0

2.15 App Inventor 2

App Inventor es un entorno de desarrollo para la elaboración de aplicaciones destinadas al sistema operativo Android. El usuario puede, de forma visual y a partir de un conjunto de herramientas básicas, ir enlazando una serie de bloques para crear una aplicación. El sistema es gratuito y se puede utilizar fácilmente desde la web del MIT. Las aplicaciones creadas con App Inventor están limitadas por su simplicidad, aunque permiten cubrir un gran número de necesidades básicas en un dispositivo móvil.

Para crear una aplicación, el primer paso es el diseño de la misma, en donde se selecciona y se arrastra una serie de componentes como botones, cajas de texto, selectores de fecha e imágenes, conectividad Bluetooth etc. En esta parte se compone el aspecto visual de la app, aunque también se agregan elementos no visibles pero que desempeñan una tarea dentro de la aplicación [38].

En la ilustración 2.55 se pueden observar las 4 diferentes secciones que conforman esta fase del desarrollo de la aplicación:

- ☞ **Palette:** Aquí se encuentran las componentes que serán parte de la aplicación.
- ☞ **Viewer:** En esta parte se observa cómo va quedando el diseño de la interfaz
- ☞ **Components:** Permite al usuario visualizar las componentes que se han utilizado, cambiar el nombre y borrarlos.
- ☞ **Properties:** Sirve para cambiar las propiedades de las componentes usadas tales como el color de la fuente, el tamaño, su posición, etc.

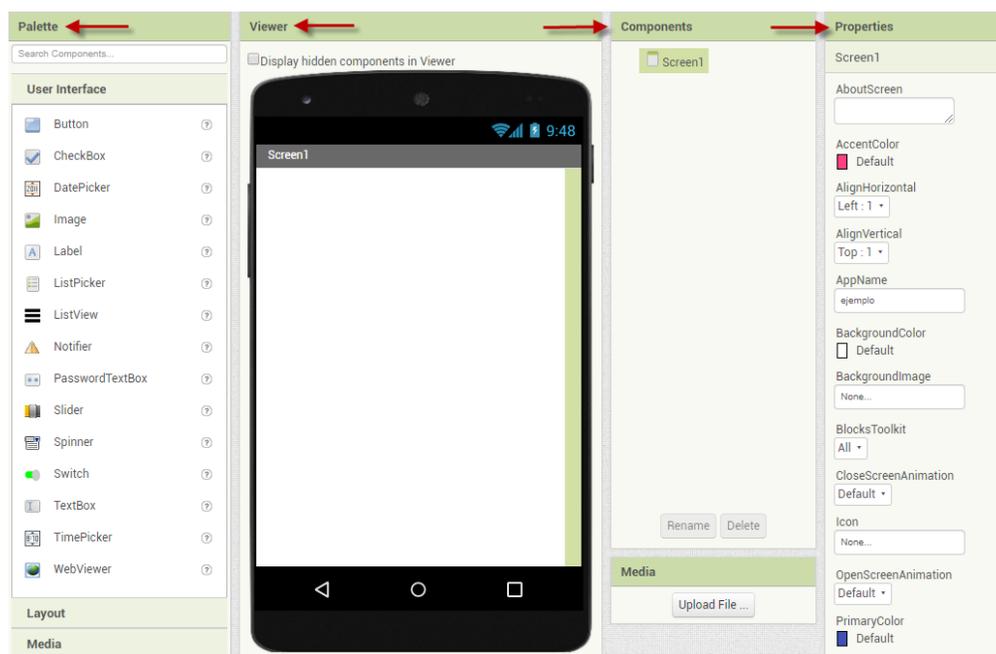


Ilustración 2.55 Sección de diseño de App Inventor 2.

Una vez diseñada la interfaz de la aplicación, lo siguiente es trasladarse al editor de bloques para imponer el comportamiento a seguir por las componentes seleccionadas previamente. Estos bloques están separados por funcionalidad y colores. En la ilustración 2.56 se muestra una parte de los bloques disponibles en este entorno.

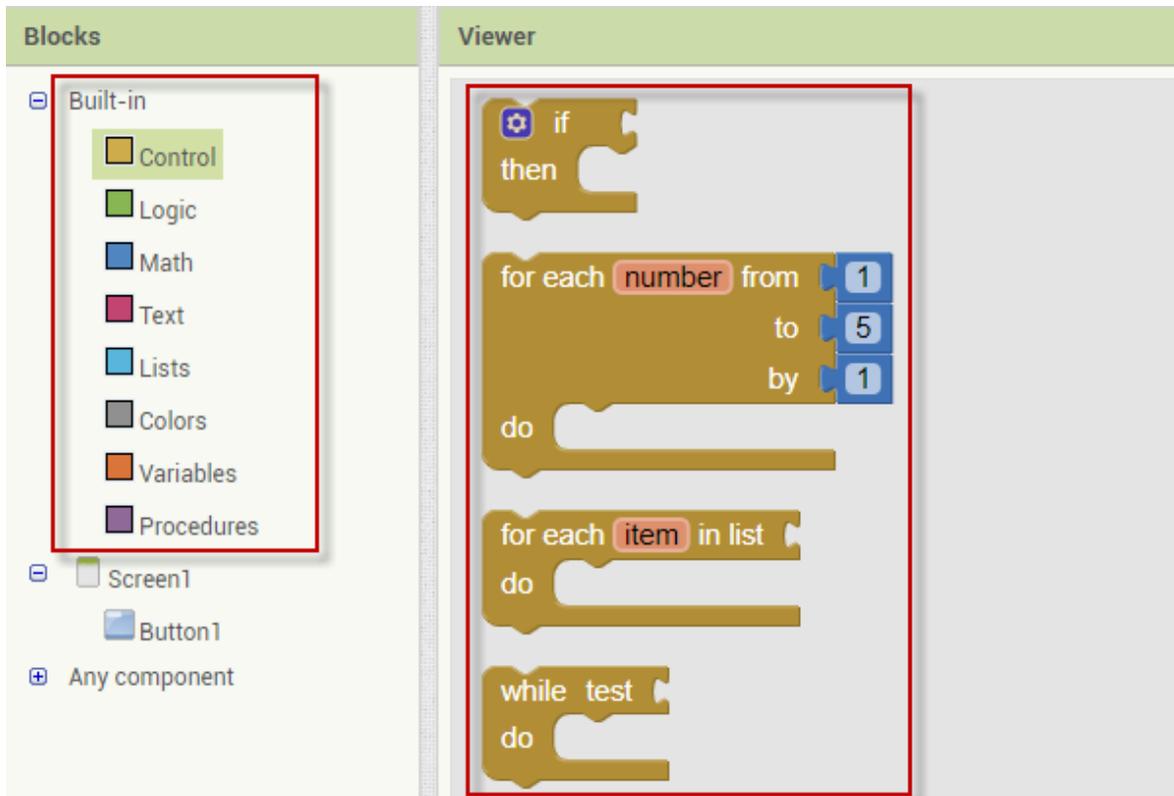


Ilustración 2.56 Editor de bloques de App Inventor 2.

2.16 Bocinas

Básicamente una bocina, también conocidas como altavoz, es un transductor o convertor de energía eléctrica en energía acústica. Es decir, el altavoz recibe del amplificador señales eléctricas correspondientes a una determinada información de audio y, por procedimientos diversos, las transforma en las variaciones de presión del aire circundante correspondientes a esas señales. La corriente eléctrica correspondiente a la señal de audio, circula por la bobina, generando un campo magnético alterno que interacciona con el campo magnético constante del imán, produciendo una fuerza en la bobina. Esta fuerza ocasiona desplazamientos en el cono, como si de un pistón se tratase. Los desplazamientos del cono crean una variación de presión en el aire que es lo que reconocemos como sonido. En la ilustración 2.57 se observa un diagrama que da una idea general sobre el funcionamiento de una bocina [39].

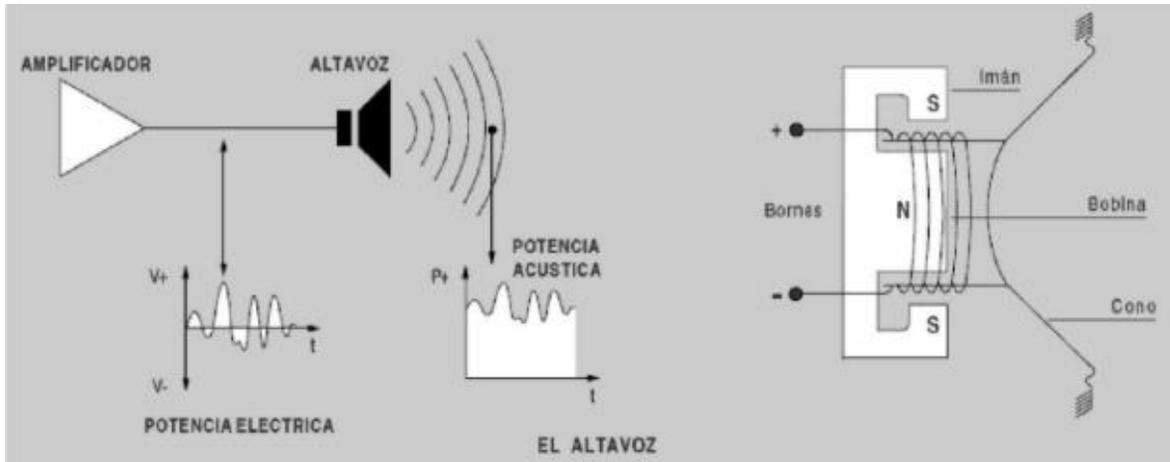


Ilustración 2.57 Diagrama de una bocina.

2.16.1 Características de las bocinas

☞ **Impedancia:** La impedancia de un altavoz no es solamente la resistencia que acostumbramos a medir entre sus terminales con un multímetro, sino que incorpora también componentes reactivas como es la inductancia de la bobina o incluso la influencia de la caja o alojamiento donde esté instalado. En la ilustración 2.58 se muestra una relación entre la impedancia y resistencia de un altavoz.

R (Ω)	2.5 a 3.5	5 a 7	10 a 15	18 a 23
Z (Ω)	4	8	16	25

Ilustración 2.58 Relación entre impedancia y resistencia de una bocina.

☞ **Respuesta en frecuencia:** A la gama de frecuencias que un altavoz es capaz de reproducir con un determinado nivel de eficacia y calidad se le denomina respuesta en frecuencia del mismo. Es fundamental determinar los límites mínimos que se consideran aceptables en el momento de comparar los datos de respuesta en frecuencia de las bocinas.

☞ **Ángulo de cobertura y directividad:** El ángulo de cobertura de un altavoz es aquel en el que el nivel de presión sonora se reduce en 6 dB con relación al que proporciona en su eje. Otro concepto importante es el índice de directividad (Q) de una bocina, que es una relación entre el nivel de presión sonora que el altavoz produce en una determinada dirección comparado con la media de los niveles de presión que produce en todas las direcciones. Este índice informa de cómo una bocina concentra la

potencia acústica en la dirección útil, evitando radiar potencia en otras direcciones. Las bocinas con un Q elevado permiten concentrar la potencia acústica en la dirección del auditorio. En la ilustración 2.59 se observa un ejemplo del índice de directividad.

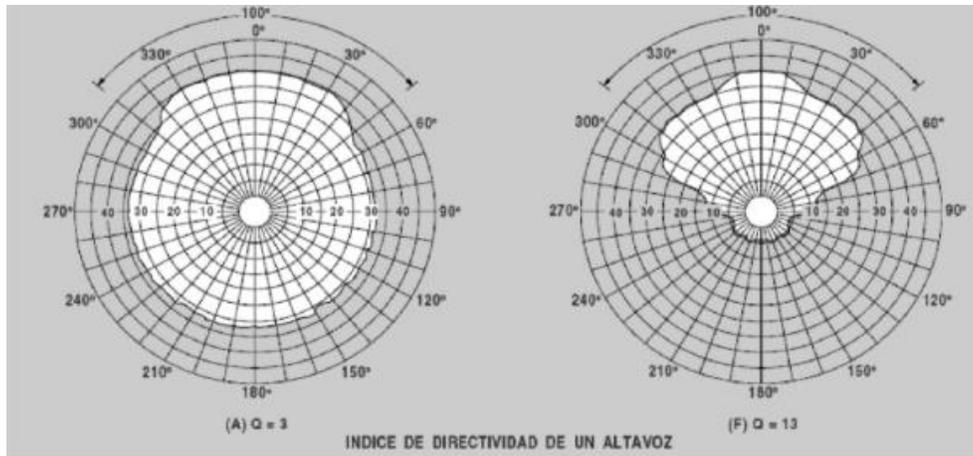


Ilustración 2.59 Índice de directividad de una bocina.

- ☞ **Eficiencia y sensibilidad:** Indica la relación entre la potencia acústica que produce por cada Watt eléctrico que se le proporciona. El concepto de sensibilidad define el nivel de presión sonora que un altavoz produce a 1 m de distancia en su eje cuando se alimenta con 1 W de potencia de audio.
- ☞ **Potencia máxima:** La potencia máxima es aquella que puede soportar, de forma continua, en prolongados periodos de tiempo. Está determinada por la capacidad de evacuación de calor que posea. Este es un valor expresado en Watts (W).

2.17 Fuentes de alimentación.

La función de una fuente de alimentación (ilustración 2.60) es convertir la tensión alterna en una tensión continua y lo más estable posible, para ello se usan los siguientes componentes [40]:

1. Transformador de entrada
2. Rectificador a diodos
3. Filtro para el rizado
4. Estabilizador lineal, este último no es imprescindible.

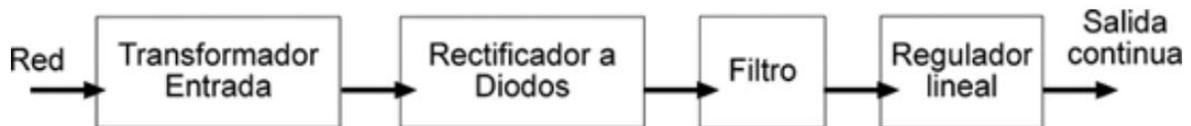


Ilustración 2.60 Diagrama a bloques de una fuente de alimentación.

2.17.1 Transformador de entrada.

El transformador de entrada reduce la tensión de red (120 V_{AC}) a otra tensión más adecuada para ser tratada. Solo es capaz de trabajar con corrientes alternas, esto quiere decir que la tensión de entrada será alterna y la de salida también. Consta de dos arrollamientos sobre un mismo núcleo de hierro, ambos arrollamientos, primario y secundario, son completamente independientes y la energía eléctrica se transmite del primario al secundario en forma de energía magnética a través del núcleo.

La corriente que circula por el arrollamiento primario (el cual está conectado a la red) genera una circulación de corriente magnética por el núcleo del transformador. Esta corriente magnética será más fuerte, cuantas más vueltas tenga el arrollamiento primario. En el arrollamiento secundario ocurre el proceso inverso, la corriente magnética que circula por el núcleo genera una tensión que será tanto mayor dependiendo del número de espiras del secundario y cuanto mayor sea la corriente magnética que circula por el núcleo (la cual depende del número de espiras del primario).

2.17.2 Rectificador a diodos.

El rectificador es el que se encarga de convertir la tensión alterna que sale del transformador en tensión continua. Para ello se utilizan diodos. Un diodo conduce cuando la tensión de su ánodo es mayor que la de su cátodo.

El rectificador se conecta después del transformador, por lo tanto, entra tensión alterna y tendrá que sacar tensión continua, es decir, un polo positivo y otro negativo (ilustración 2.61)

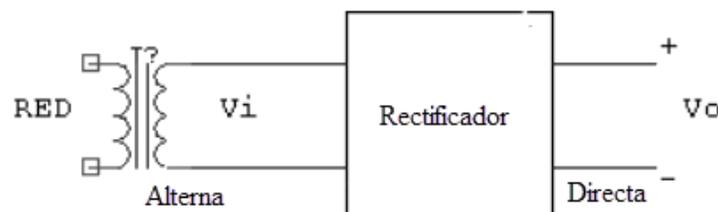


Ilustración 2.61 Rectificador de diodos.

2.17.3 Filtro.

La tensión en la carga que se obtiene de un rectificador es en forma de pulsos. En un ciclo de salida completo, la tensión en la carga aumenta de cero a un valor de pico, para caer después de nuevo a cero. Esta no es la clase de tensión continua que precisan la mayor parte de circuitos electrónicos. Lo que se necesita es una tensión constante, similar a la que produce una batería. Para obtener este tipo de tensión rectificada en la carga es necesario emplear un filtro. El tipo más común del condensador a la entrada (ilustración 2.62), en la mayoría de los casos perfectamente válido.

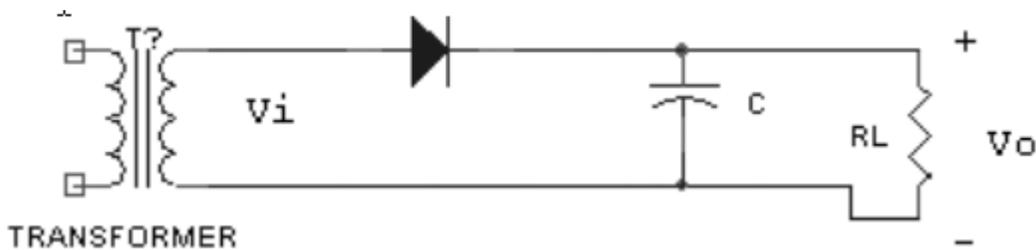


Ilustración 2.62 Filtro de capacitor a la entrada.

2.17.4 Regulador lineal.

Un regulador es un circuito que se encarga de reducir el rizado y de proporcionar una tensión de salida exactamente como se desea. Los reguladores integrados de tres terminales son los más sencillos y baratos. En la ilustración 2.63 se observa la imagen de una fuente de alimentación regulada con uno de estos dispositivos:

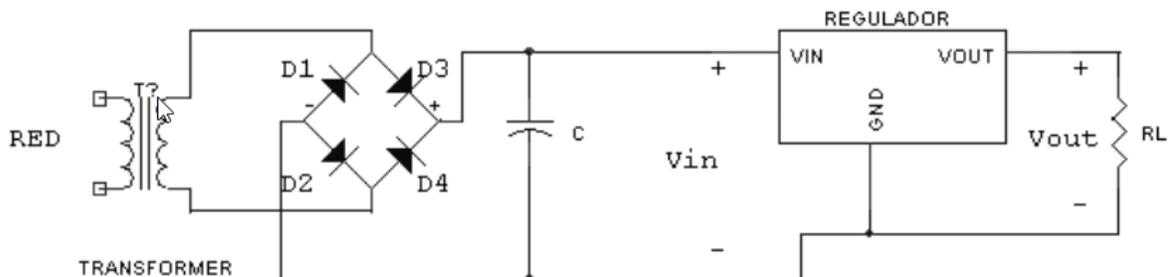


Ilustración 2.63 Regulador lineal.

Las ideas básicas de funcionamiento de un regulador de este tipo son:

1. La tensión entre los terminales V_{out} y GND es de un valor fijo, no variable, que dependerá del modelo de regulador que se utilice.

2. La corriente que entra o sale por el terminal GND es prácticamente nula y no se tiene en cuenta para analizar el circuito de forma aproximada. Funciona simplemente como referencia para el regulador.
3. La tensión de entrada V_{in} deberá ser siempre unos 2 o 3 V superior a la de V_{out} para asegurarnos el correcto funcionamiento.

3 Desarrollo experimental

Para la realización del proyecto se planteó: poder modificar el volumen y la ganancia de las frecuencias (graves, medias y agudas) a través de una aplicación para un dispositivo Android con Bluetooth, elaborar un ecualizador de tres bandas capaz de acoplarse al control digital sin interferir con la señal analógica, diseñar un amplificador de potencia que ayude a poder escuchar con mayor volumen el sonido de la guitarra. La aplicación debe tener una interfaz gráfica donde haya una sección de emparejamiento con Bluetooth para enlazar los dispositivos y tenga cuatro sliders con un rango de cero a noventa y nueve, los sliders controlaran la ganancia de los tres rangos de frecuencia y el volumen del amplificador. Al mover cualquiera de los sliders, la aplicación deberá transmitir al Arduino, una cadena de caracteres que incluye el valor de los cuatro selectores. El microcontrolador al recibir el paquete de datos, lo tendrá que procesar y separar en variables independientes para asignar cada valor numérico al potenciómetro digital correspondiente y así poder expresar los valores en una pantalla LCD. Para poder realizar ajustes sin el uso de la aplicación, se elaboró un control por botones que se encuentra en el panel del amplificador, con un total de 8, 2 por cada potenciómetro (uno para disminuir la amplitud y otro para incrementarla), al presionar alguno de ellos, el microcontrolador debe enviar una letra a la aplicación y al procesarla tiene que cambiar la posición de alguno de los sliders, al hacerlo el celular transmitirá una nueva cadena de caracteres.

Para poder desarrollar esta propuesta, se dividió en seis etapas principales:

1. Diseño del ecualizador de tres bandas.
2. Desarrollo de la aplicación.
3. Programación de Arduino.
4. Desarrollo del amplificador de potencia.
5. Diseño de fuente de alimentación.

3.1 Diagrama a bloques.

Se creó un diagrama a bloques (ilustración 3.1) para visualizar mejor el funcionamiento del dispositivo.

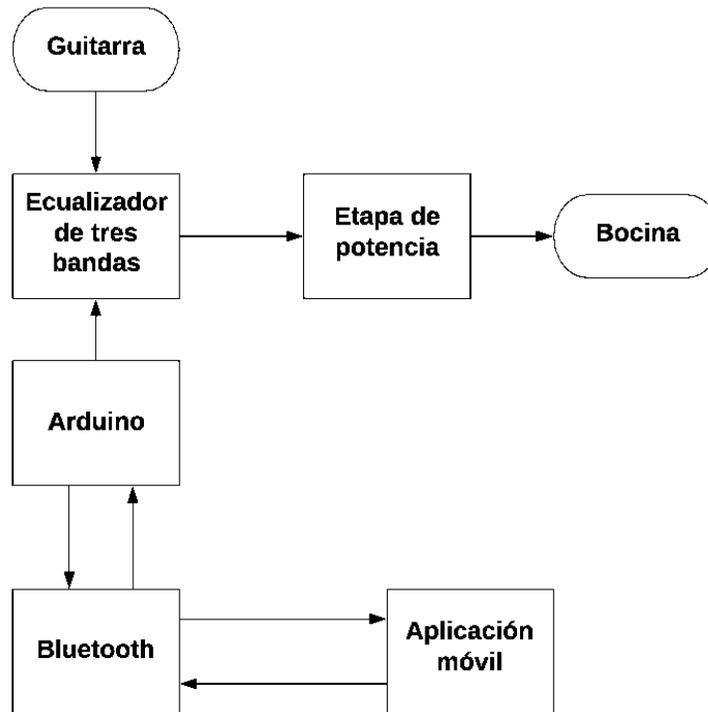


Ilustración 3.1 Diagrama a bloques del sistema.

Donde:

- ☞ **Guitarra:** el instrumento que se amplifica y controla con este dispositivo.
- ☞ **Ecuador de tres bandas:** etapa que permite controlar la ganancia de las frecuencias graves, medias y agudas de la guitarra.
- ☞ **Arduino:** la tarjeta de desarrollo que se utiliza para controlar los valores de resistividad en los potenciómetros digitales.
- ☞ **Bluetooth:** dispositivo y protocolo con el que se realiza la comunicación entre el Arduino y el dispositivo Android.
- ☞ **Aplicación móvil Android:** es donde se realizarán los cambios en la resistividad de los potenciómetros digitales.
- ☞ **Etapa de potencia:** etapa que acondiciona la señal para que pueda excitar una bocina
- ☞ **Bocina:** transductor de señales eléctricas a audio.

3.2 Diseño del ecualizador de tres bandas.

En base al rango de frecuencias con las que trabaja la guitarra se definieron tres anchos de banda:

- ☞ **Frecuencias bajas:** 0 a 500 Hz.
- ☞ **Frecuencias medias:** 500 Hz – 1.5 KHz.
- ☞ **Frecuencias agudas:** 1.5 KHz – 6 KHz.

Al ya tener estos parámetros definidos se utilizó la herramienta “Filter Design Tool”, para facilitar el desarrollo de los tres tipos de filtros (pasa bajas, pasa banda y pasa altas). Los filtros comparten los mismos valores en algunas de sus características, las cuales son: la ganancia, la topología, la tolerancia de las resistencias/capacitores y la respuesta del filtro. La ganancia tiene un valor de 10. Se optó por usar topología de retroalimentación múltiple para reducir el número de componentes y porque invierte la entrada de la señal, esto es necesario para poder usar un amplificador inversor que controle la ganancia de la salida de cada filtro, sin que la señal se invierta. La tolerancia se fijó de 5% para las resistencias y capacitores, porque son los valores más comunes. La respuesta de los filtros es de tipo Butterworth porque tiene una respuesta más suave y esto ayuda a que el sonido no se distorsione.

3.2.1 Filtro pasa bajas.

Para el filtro pasa bajas se utilizó un filtro de 5° orden (ilustración 3.2), usando una frecuencia de paro de 1.5 KHz y una atenuación de -40dB (ilustración 3.3).

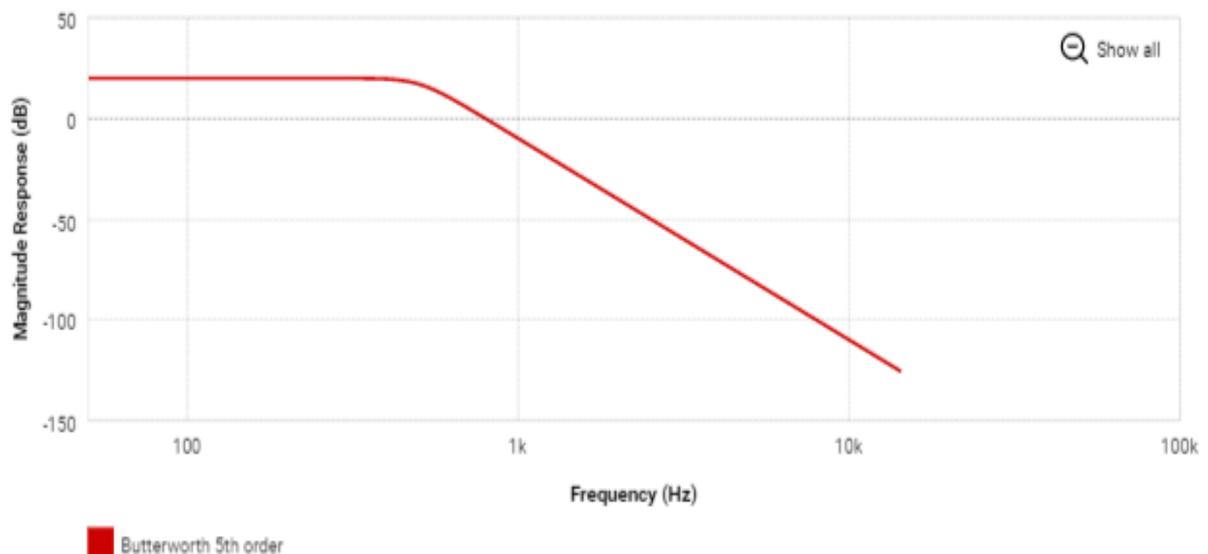


Ilustración 3.2 Respuesta del filtro de 5° orden.

Specification

Stopband

Filter order

Auto

Frequency (Fs)

1500

Hz

(0.1-1G)

Attenuation (Asb)

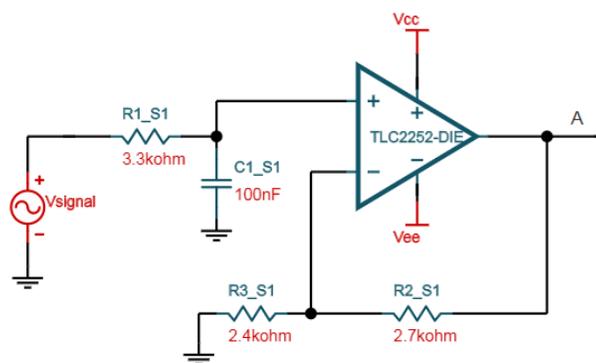
-40

dB

(-120-0)

Ilustración 3.3 Características de la frecuencia de paro para el filtro pasa bajas.

El programa generó el siguiente circuito (ilustración 3.4) con las características que debe tener cada componente para que el filtro funcione correctamente, el circuito se seccionó en tres para observarlo correctamente, uniendo A con A y B con B se consigue el circuito completo.



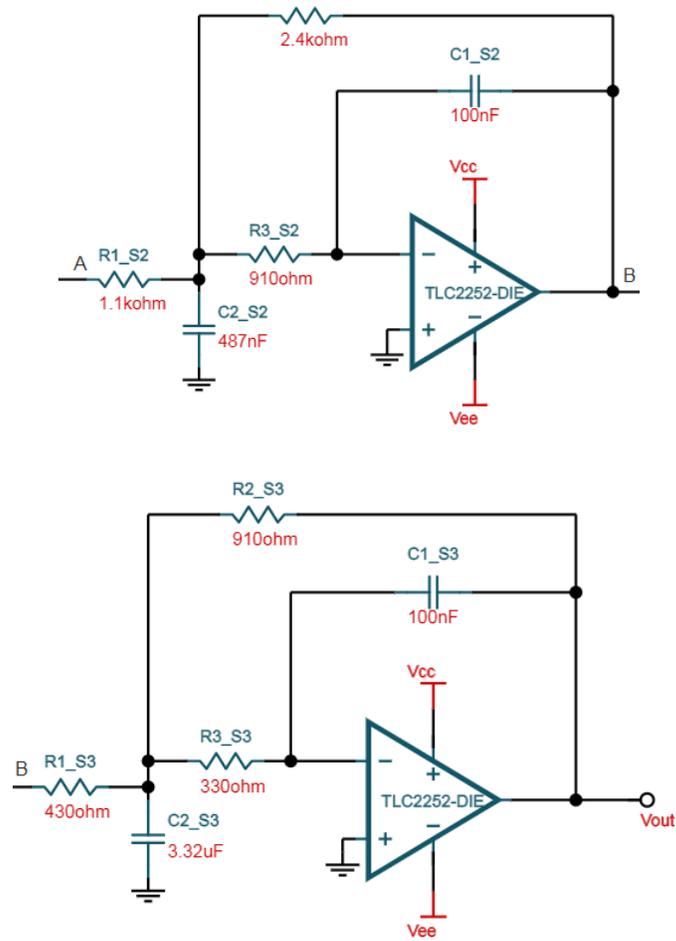


Ilustración 3.4 Diagrama del circuito.

3.2.2 Filtro pasa altas

En el filtro pasa altas se utilizó un filtro de 6° orden (ilustración 3.5), usando una frecuencia de paro de 630Hz y una atenuación de -60dB (ilustración 3.6).

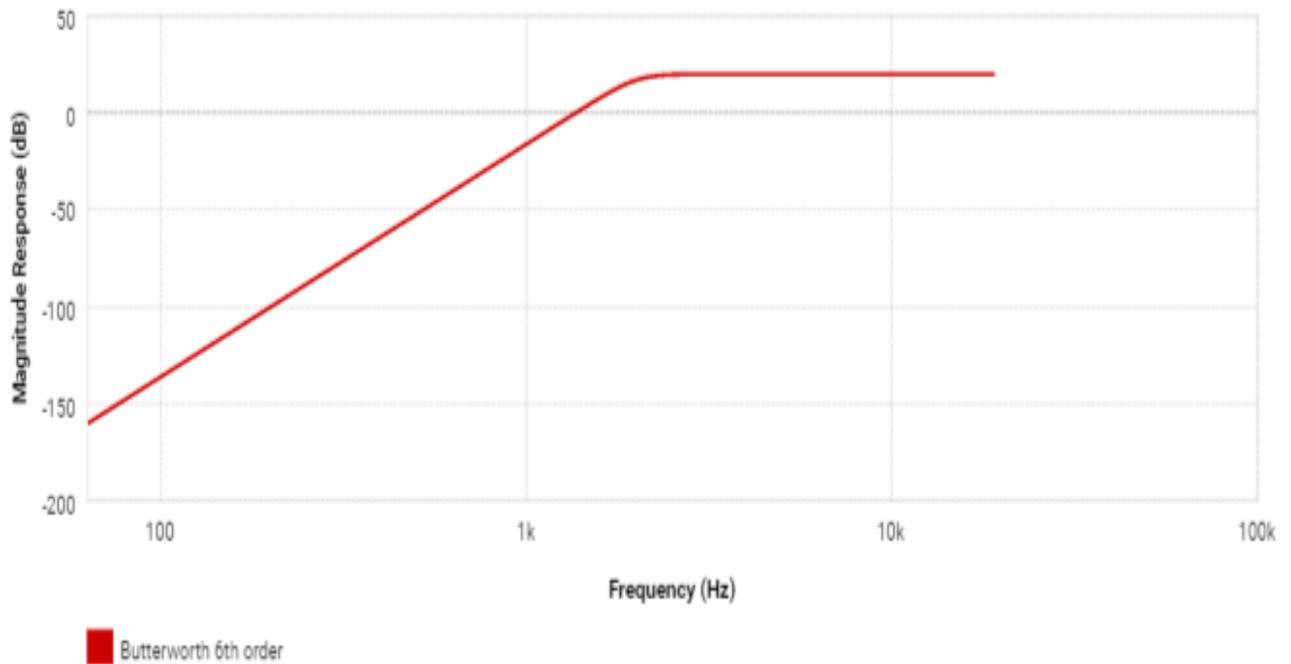


Ilustración 3.5 Respuesta del filtro de 6° orden.

Specification

Stopband

Filter order
Auto

Frequency (Fs)
630 Hz
(0.1-1G)

Attenuation (Asb)
-60 dB
(-120-0)

Ilustración 3.6 Características de la frecuencia de paro para el filtro pasa altas.

El programa generó el circuito que se observa en la ilustración 3.7, con las características que debe tener cada componente para que el filtro funcione de manera correcta, el circuito se muestra en tres secciones diferentes para una mejor presentación.

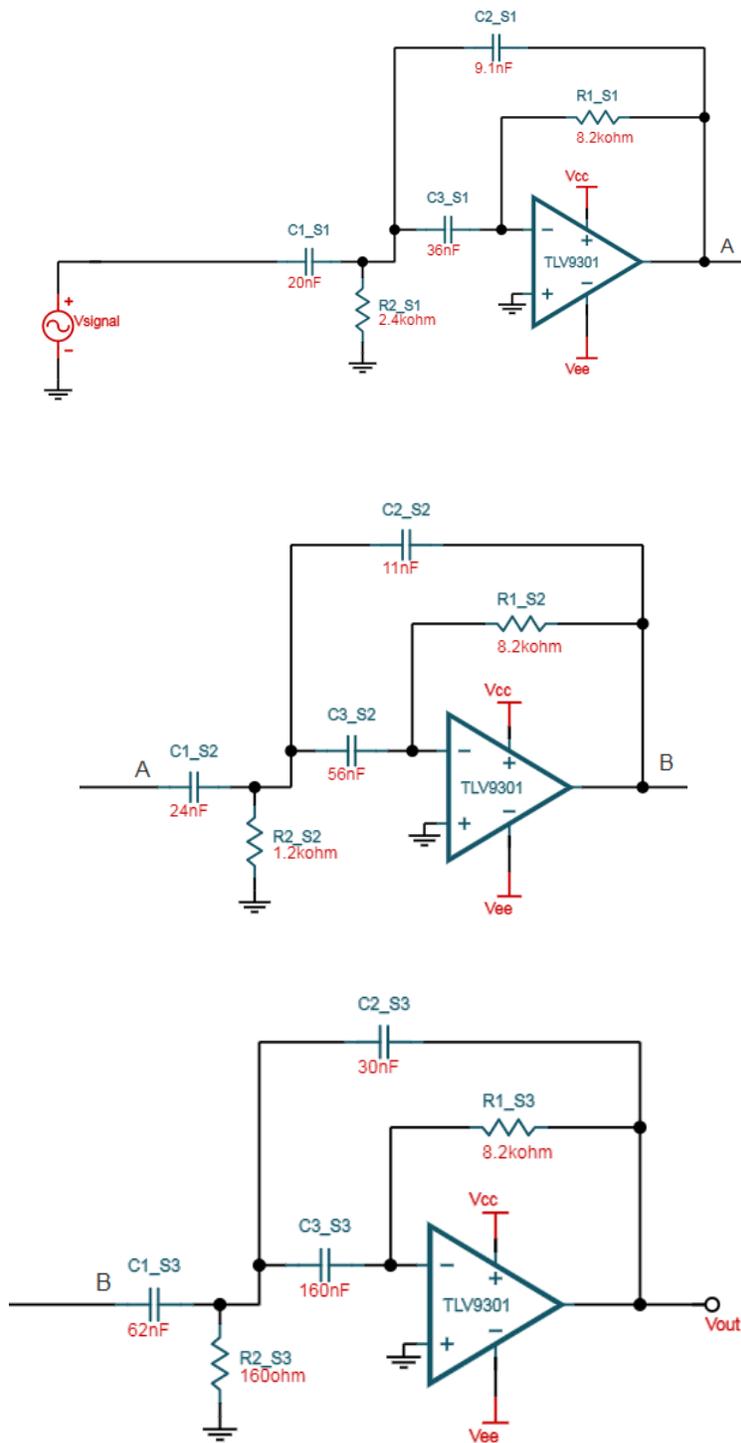


Ilustración 3.7 Diagrama del filtro pasa bajas.

3.2.3 Filtro pasa banda:

En el filtro pasa banda se utilizó un filtro de 4° orden (ilustración 3.8), usando una frecuencia de corte inicial de 800Hz (ilustración 3.9) y una frecuencia de corte final de 1400 Hz (ilustración 3.10), el filtro tiene una atenuación de -40dB.

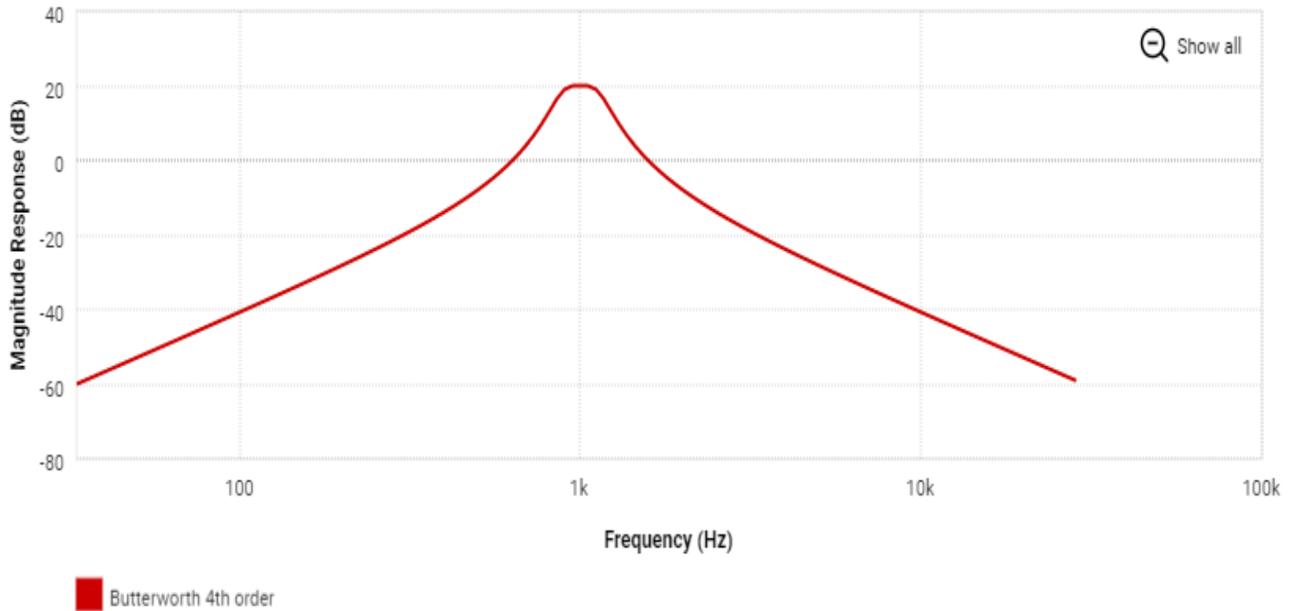


Ilustración 3.8 Respuesta del filtro de 4° orden.

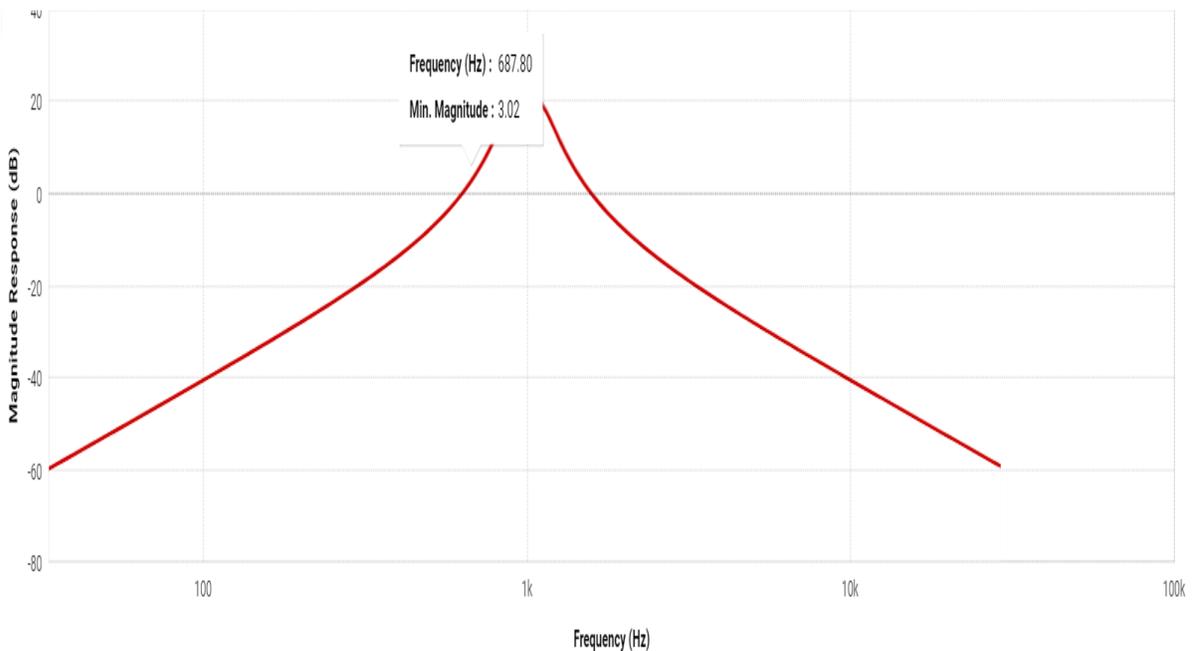


Ilustración 3.9 Frecuencia de corte inicial.

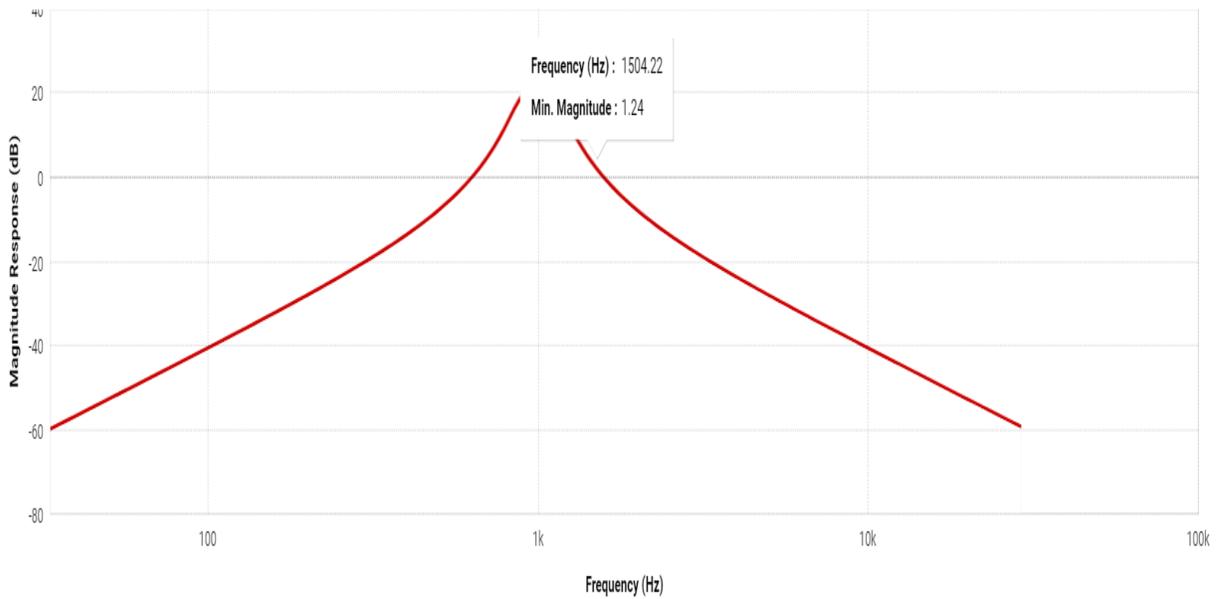


Ilustración 3.10 Frecuencia de corte final.

El filtro posee las siguientes características de la frecuencia de paro (ilustración 3.11).

Specification

Auto ▼

Bandwidth (BWs)
3000 Hz
(0.1-1G)

Attenuation (Asb)
-40 dB
(-120-0)

Ilustración 3.11 Especificaciones de la frecuencia de paro para el filtro pasa banda.

El programa generó el siguiente circuito (ilustración 3.12) con las características que debe tener cada componente para que el filtro funcione de manera correcta.

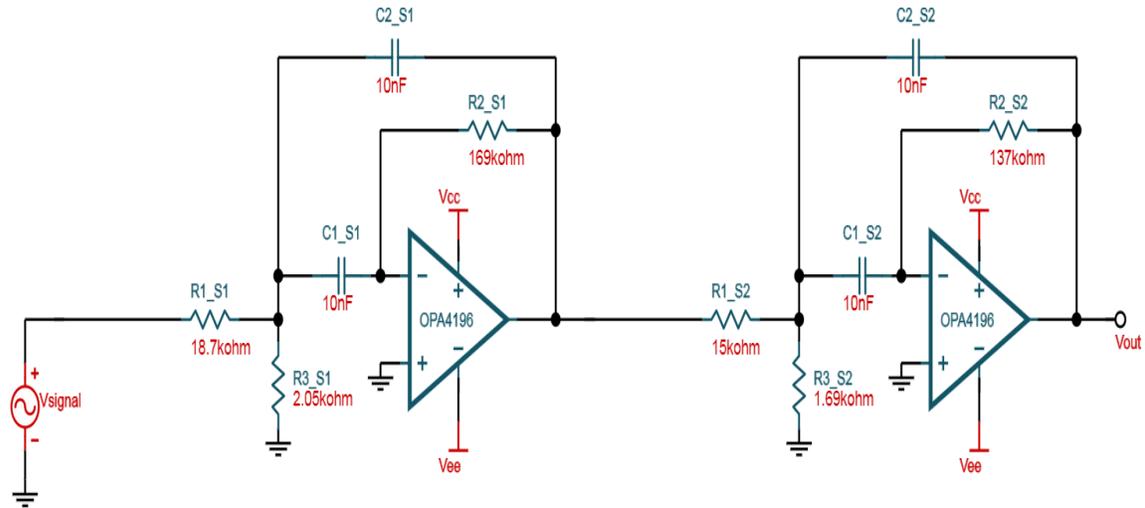


Ilustración 3.12 Diagrama del circuito.

3.2.4 Control de ganancia.

Para poder controlar la ganancia de cada uno de los filtros con los potenciómetros digitales se diseñó un circuito que utiliza OPAMS OPA2134, debido a su bajo ruido, baja distorsión y por su ganancia que se mantiene lineal en todo el ancho de banda de la guitarra. Los OPAMS se encuentran en configuración inversora para que la señal no se invierta. Para los filtros se mantiene una ganancia con un rango de 0 a 1.5. Por la terminal positiva hay un divisor de voltaje que sirve para darle un offset a la señal para que no esté invertida y tiene un capacitor para reducir posibles ruidos; para unir el control digital con el control de ganancia se utilizaron conectores JRSTPH.

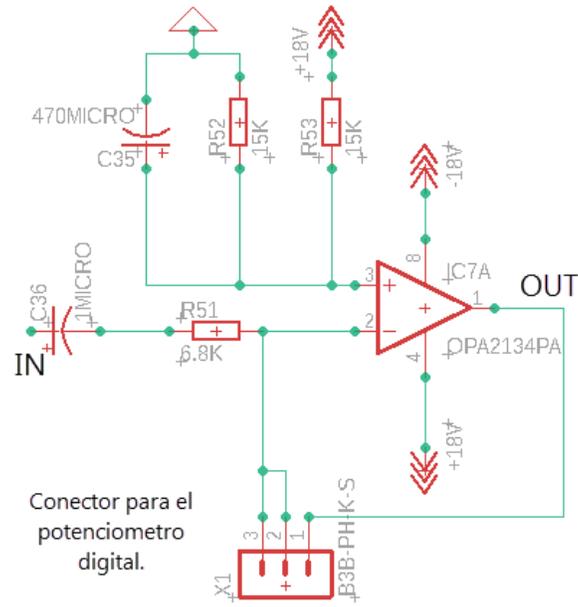


Ilustración 3.13 Diagrama del control de ganancia.

Para poder sumar las señales de cada filtro se usaron 3 resistencias de 100 ohm que llegan a un nodo común (ilustración 3.14).

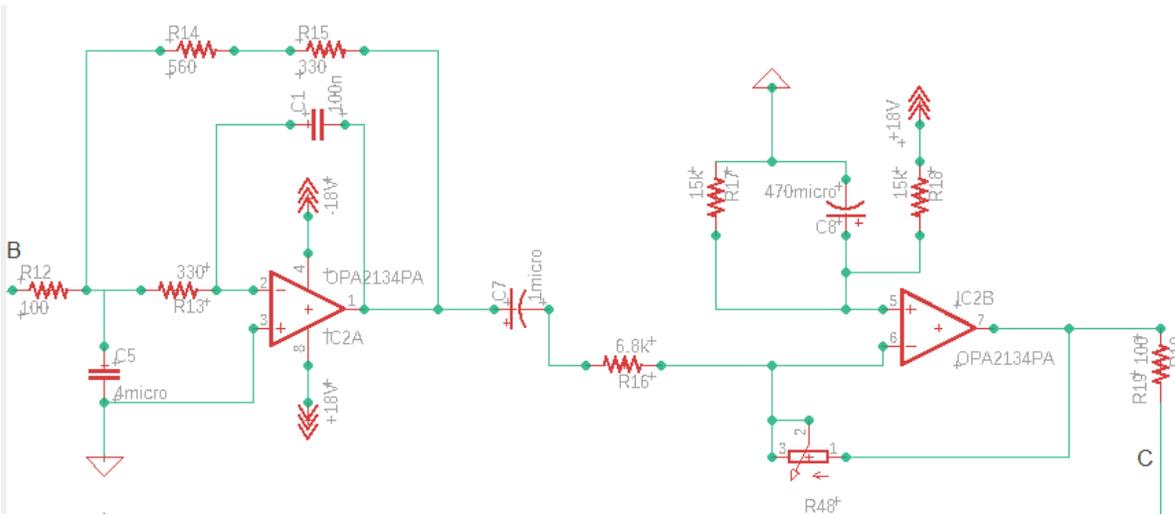
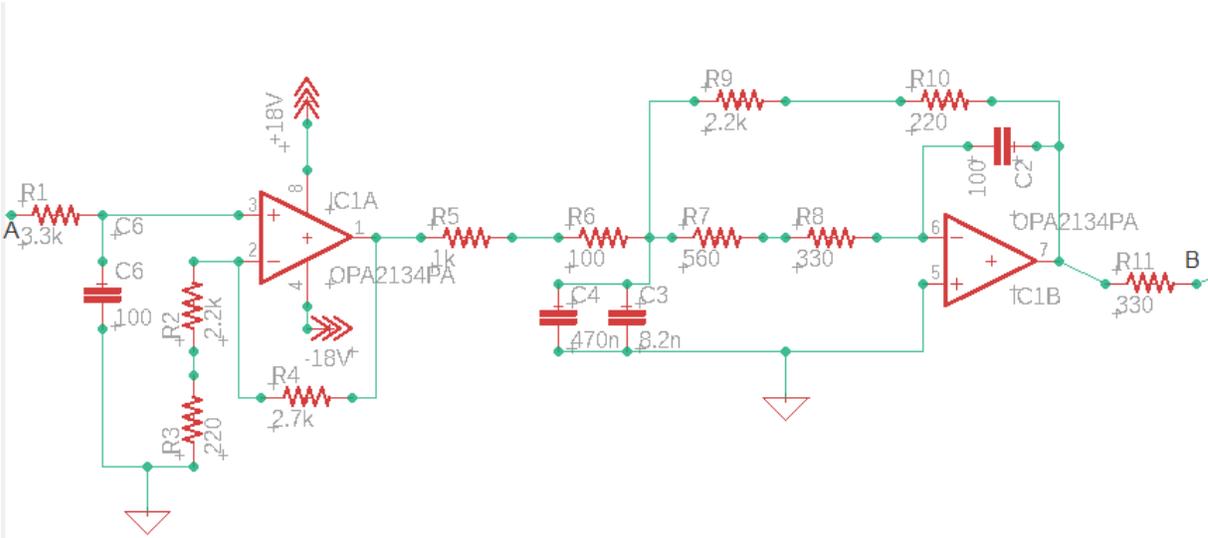


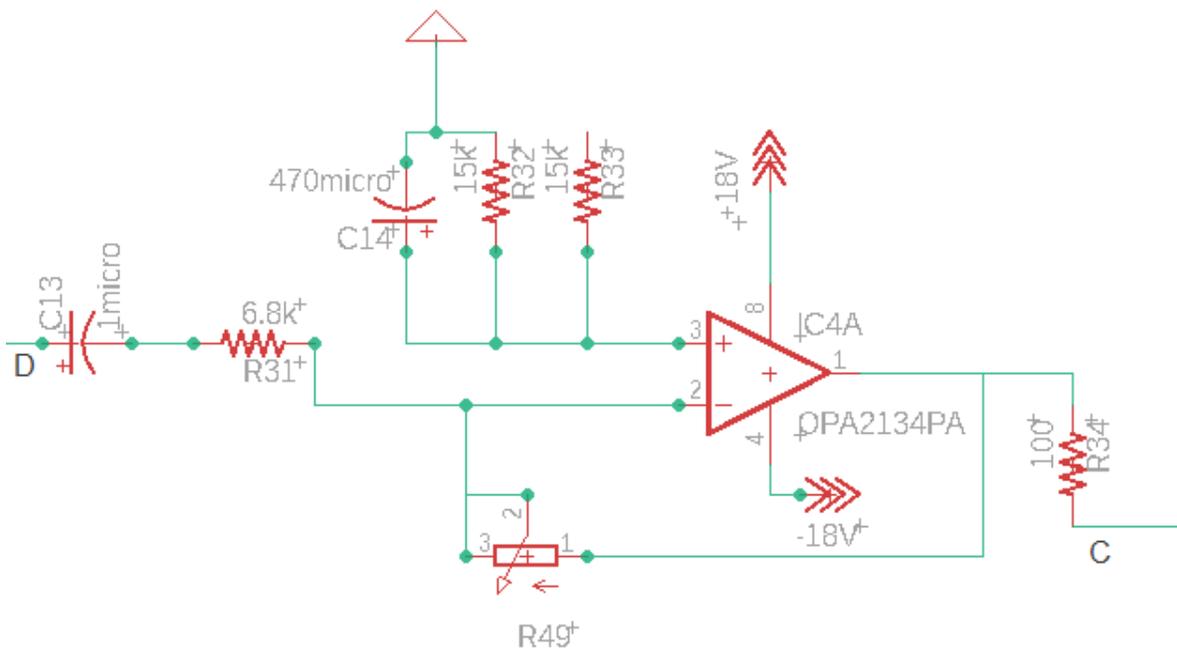
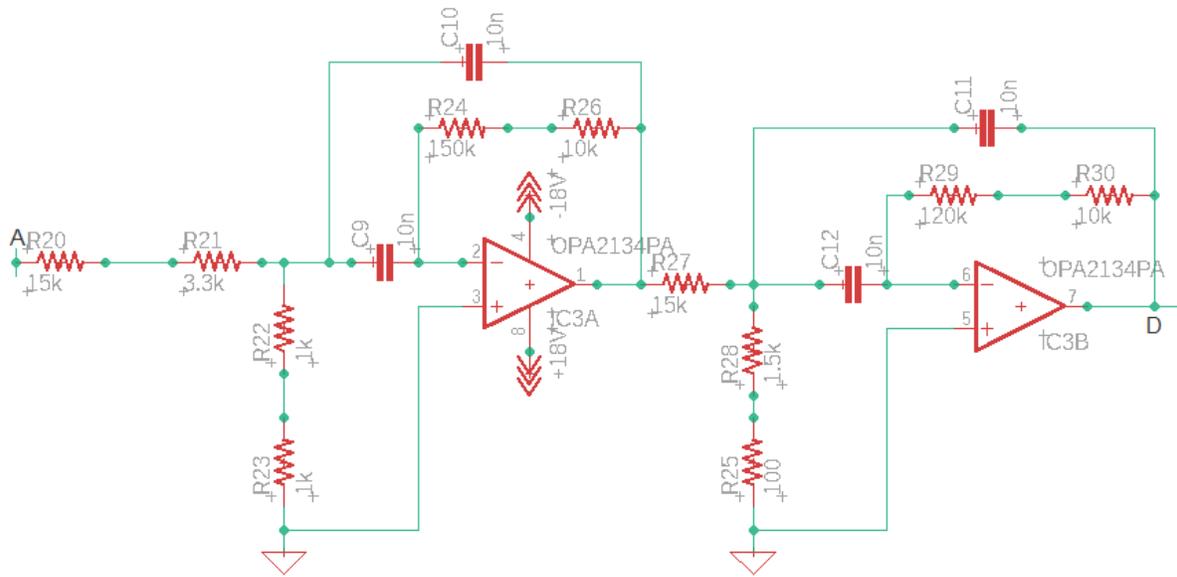
Ilustración 3.14 Sumador.

3.2.5 Diseño del circuito.

En la ilustración 3.15 se muestra como está diseñado el circuito ecualizador de tres bandas con el control de ganancia para cada filtro, además se puede ver todas las resistencias y capacitores que se utilizaron para aproximarse a los valores calculados por el programa. Para mantener una buena calidad de audio se volvieron a utilizar OPAMS OPA2134. Uniendo las

letras iguales se obtiene el circuito completo, esto se realizó para su correcta visualización, la letra A conforma la entrada y la letra C conforma la salida.





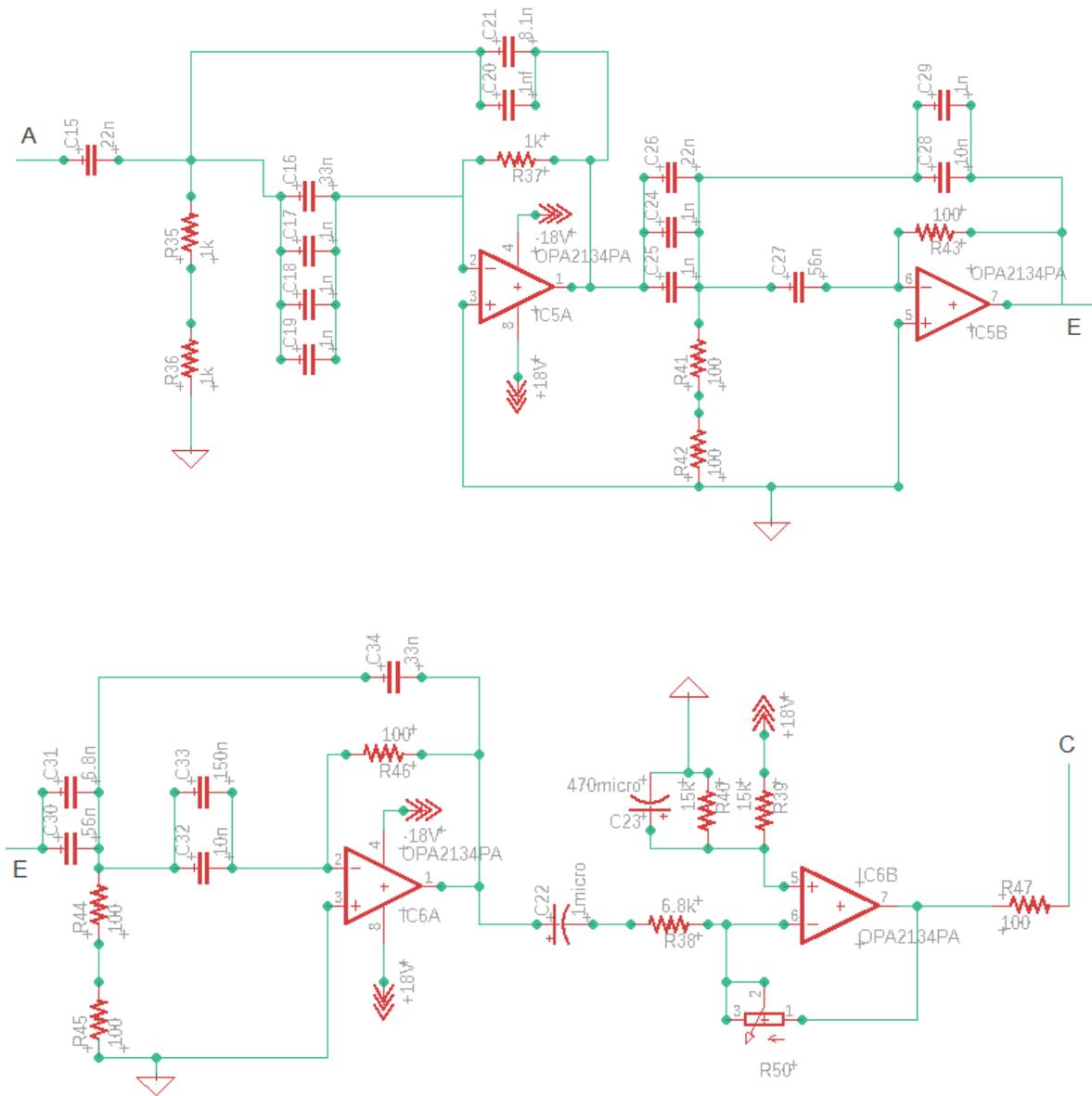


Ilustración 3.15 Esquemático del ecualizador de tres bandas con control de ganancia.

Con base al esquemático anterior se diseñaron tres placas fenólicas de doble cara, una para cada tipo de filtro con su control de ganancia:

- ☞ **Filtro pasa bajas:** en la ilustración 3.16 y 3.17 se puede observar cómo está constituida la placa fenólica del filtro pasa bajas.

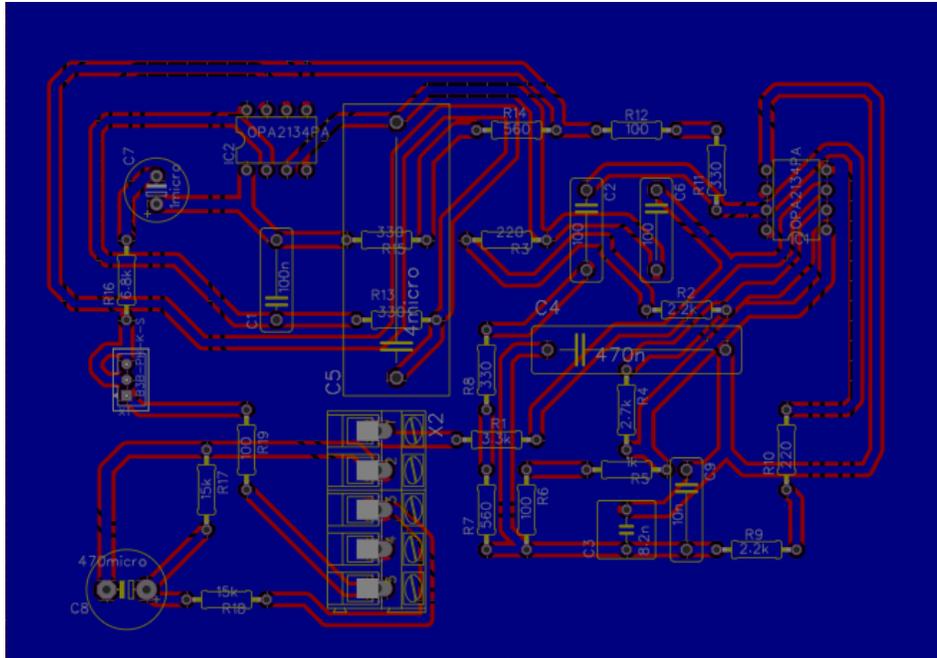


Ilustración 3.16 Cara inferior de la placa fenólica.

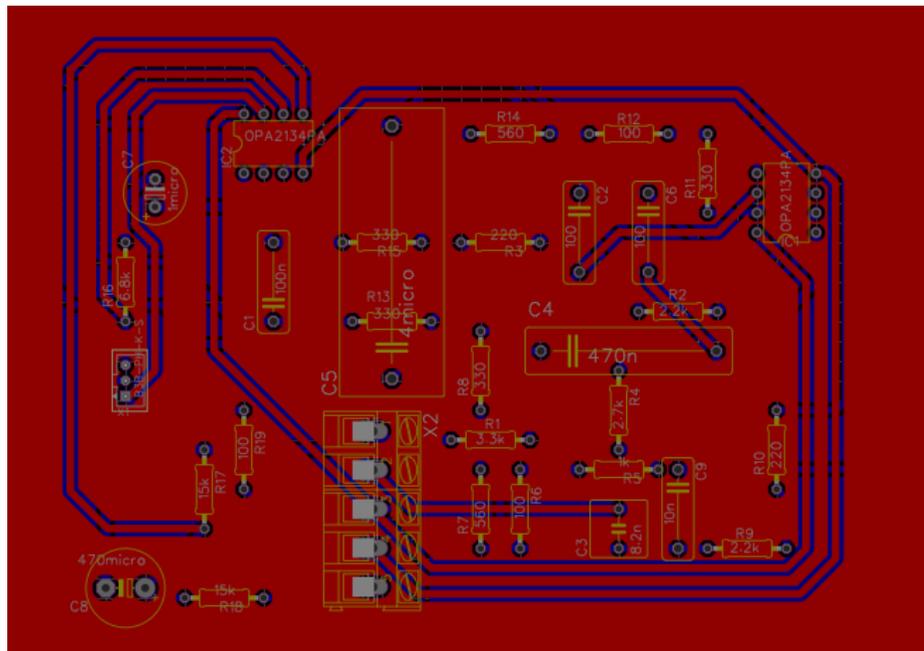


Ilustración 3.17 Cara superior de la placa fenólica.

- ☞ **Filtro pasa altas:** en la ilustración 3.18 y 3.19 se puede observar cómo está constituida la placa fenólica del filtro pasa altas.

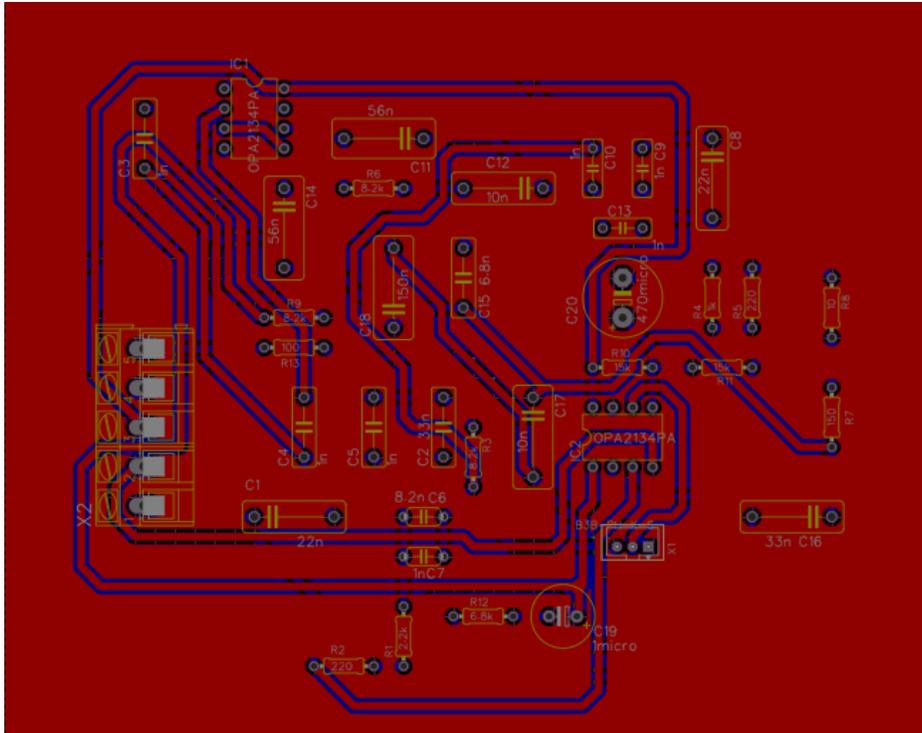


Ilustración 3.18 Cara superior de la placa fenólica.

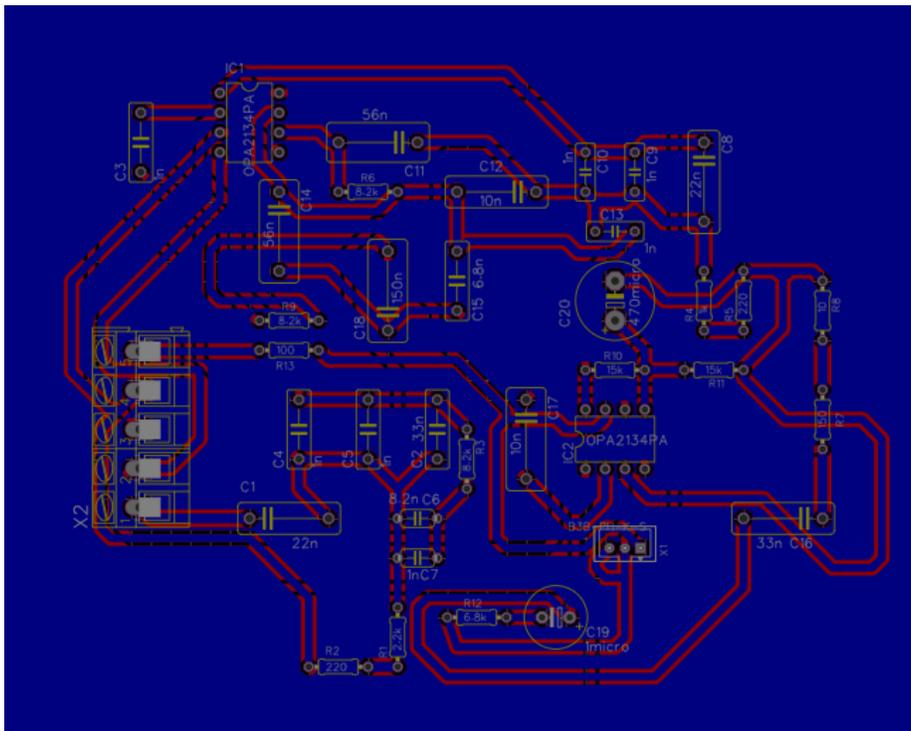


Ilustración 3.19 Cara inferior de la placa fenólica.

- 9: **Filtro pasa banda:** en la ilustración 3.20 y 3.21 se puede observar cómo está constituida la placa fenólica del filtro pasa banda.

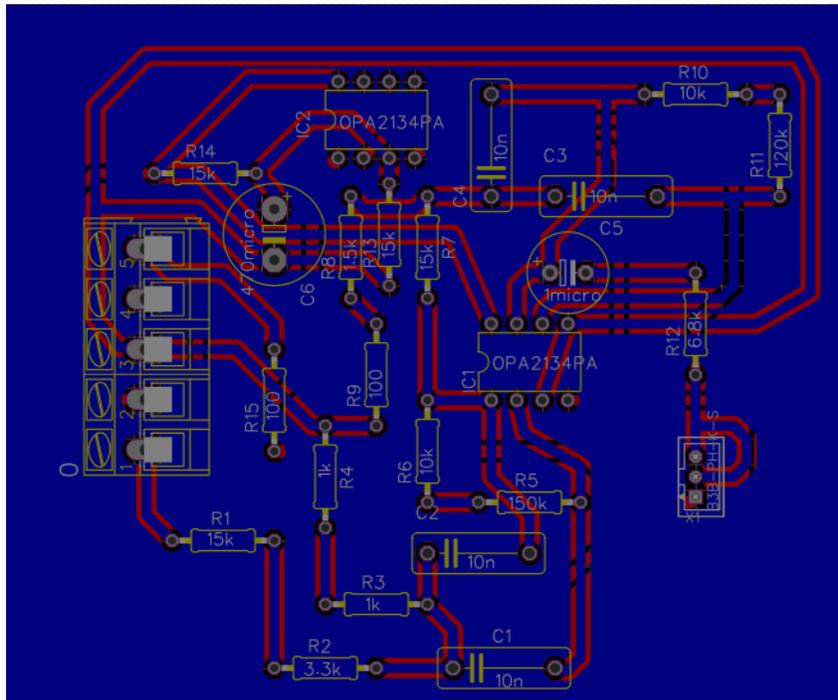


Ilustración 3.20 Cara inferior de la placa fenólica.

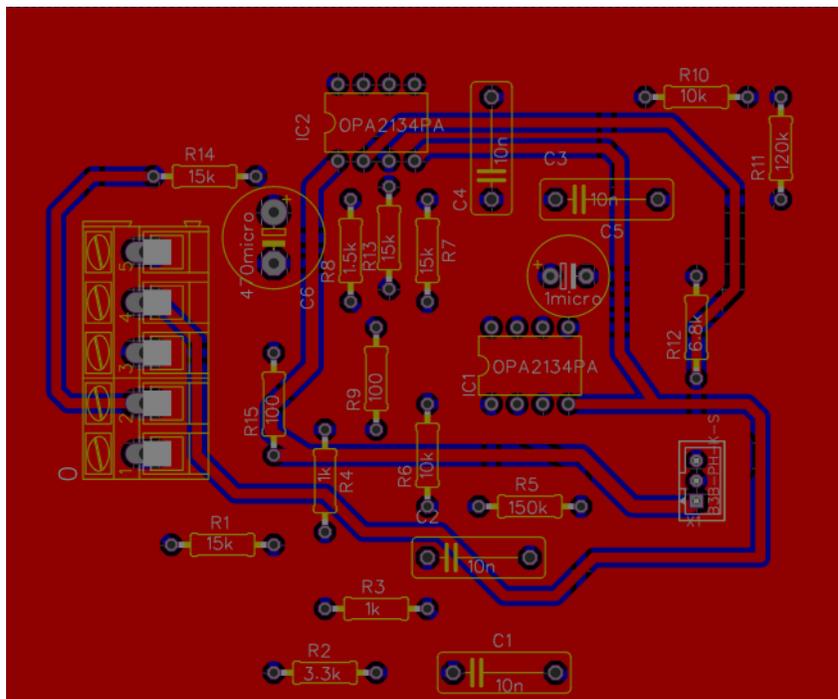


Ilustración 3.21 Cara superior de la placa fenólica.

3.3 Desarrollo de la aplicación

La aplicación Android fue elaborada en el entorno de MIT App Inventor 2, para la conectividad Bluetooth se colocó un botón que permite escoger el dispositivo a vincular; y con el fin de manipular los rangos de frecuencias (medios, graves, agudos), y la ganancia general, se emplearon 4 sliders (selectores deslizables) con valores que van de 0 a 99, mismos que serán transmitidos vía Bluetooth. Así mismo, cada slider cuenta con una etiqueta de texto en donde se representa el valor actual del selector y de los potenciómetros digitales. La interfaz gráfica (ilustración 3.22) de la aplicación se encuentra inicializada con los sliders posicionados en sus valores máximos como se observa en la figura.

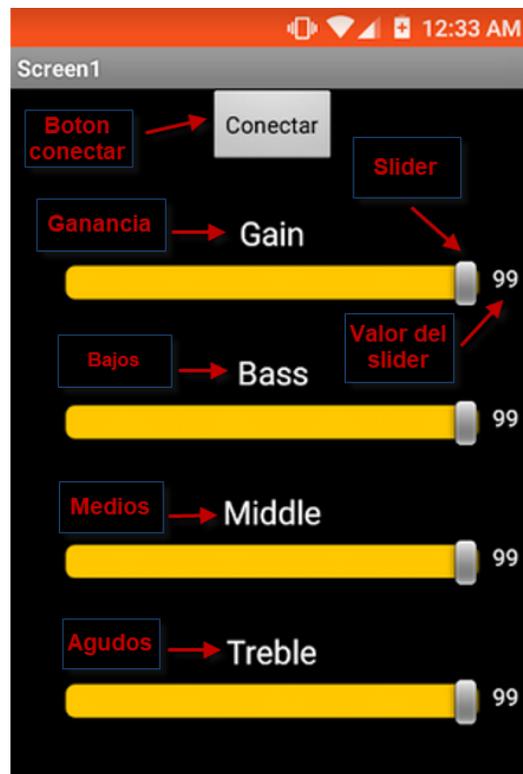


Ilustración 3.22 Interfaz gráfica de la aplicación.

3.3.1 Conectividad Bluetooth

Se estructuró el diagrama de flujo de la ilustración 3.23 como guía para la creación de los bloques (ilustración 3.24) encargados de la conectividad Bluetooth.

Para que la interfaz pueda vincularse a otro dispositivo mediante un enlace Bluetooth, se empleó un botón con el texto “Conectar” el cual, al ser presionado muestra una lista con los

nombres de los dispositivos que han sido vinculados previamente al equipo Android. Así el usuario, al ver la lista puede escoger el dispositivo a emparejar y comenzar a controlar el amplificador.

Sin embargo, lo que aparenta ser un botón, es en realidad una herramienta disponible en el entorno de App Inventor 2 conocida como “ListPicker” a la cual se le debe especificar qué hacer al ser presionada (BeforePicking) y después de ser presionada (AfterPicking).

Al ser presionada, se evalúa si la conectividad Bluetooth del teléfono o tableta Android se encuentra activa, de ser afirmativo, se mostrará la lista de los dispositivos anteriormente vinculados. En caso contrario, la lista se mostrará vacía, lo que significa que no se encuentra activada la comunicación Bluetooth del dispositivo Android.

Después de ser presionada, y cuando la lista es mostrada, ahora son necesarias más instrucciones para lograr la conexión. Al presionar el elemento de la lista al que se desea conectar, se ordenará establecer la conexión con el mismo y si el enlace fue exitoso, el texto “Conectar” cambia a color azul, como se aprecia en la ilustración 3.25, lo que sirve como indicador para el usuario sobre el estado de la conexión.

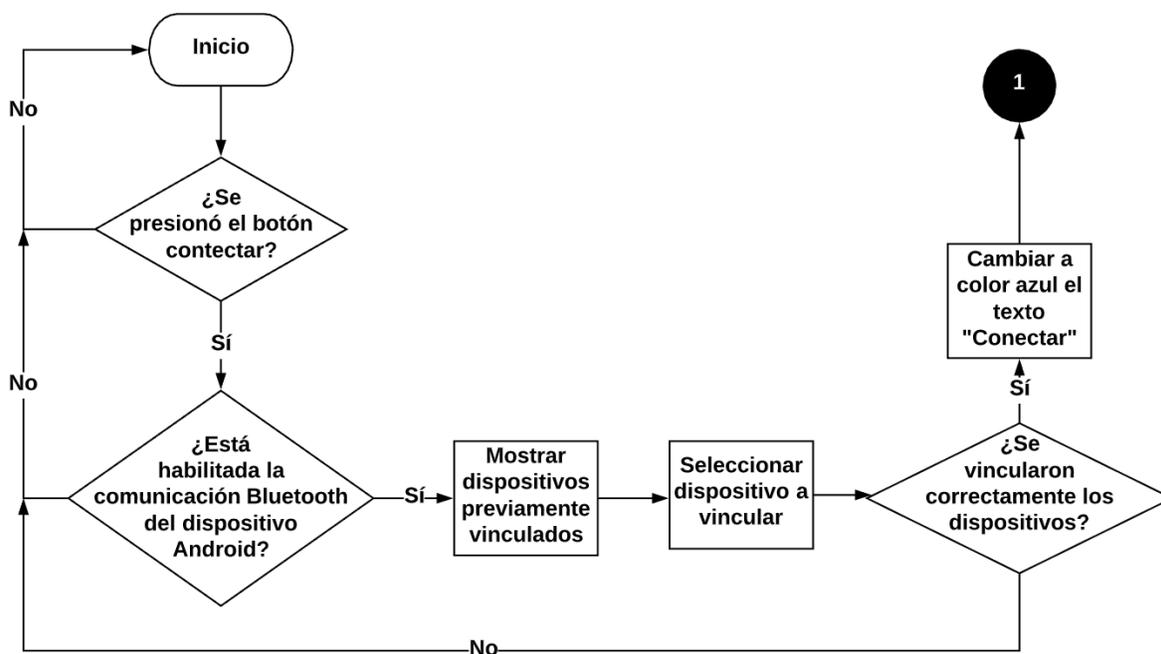


Ilustración 3.23 Diagrama de flujo de la función conectar.

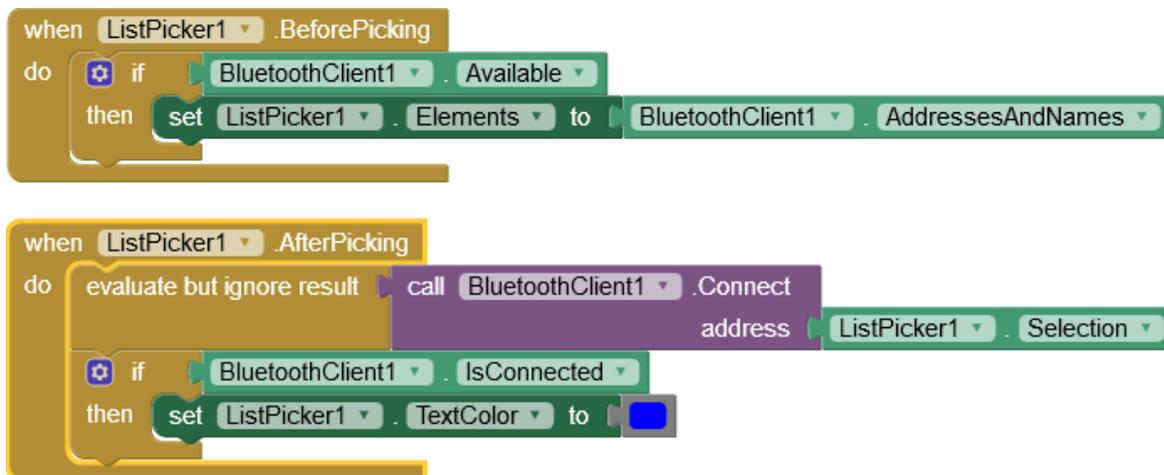


Ilustración 3.24 Bloques de la función conectar.



Ilustración 3.25 Proceso de conexión Bluetooth.

3.3.2 Recepción de información

Como los graves, medios, agudos y la ganancia del amplificador, también pueden ser modificadas de manera convencional con el uso de unos botones ubicados en el panel del amplificador, se requirió establecer una comunicación bidireccional de manera que si se realiza un ajuste utilizando el control por botones, este se vea reflejado también en la aplicación, con el objetivo de que exista sincronía entre lo que se ve en la pantalla LCD y lo que se aprecie en la interfaz gráfica del dispositivo Android.

Para ello, se implementó un bloque adicional con ayuda del diagrama de flujo de la ilustración 3.26 en donde se habilite la recepción de información vía Bluetooth. Cada vez que un botón es presionado, el microcontrolador envía una señal de control representada por una letra mayúscula, el celular al recibir la letra toma una decisión entre si aumenta o disminuye la posición de determinado selector, así este cambia de posición y al hacerlo, transmite una nueva cadena de texto con el valor recién modificado incluido. Lo anterior es ejecutado por el bloque de la ilustración 3.27. El bloque completo se encuentra en el anexo B.

La recepción funciona con un reloj (timer) que evalúa cada 150 ms, si el Bluetooth se encuentra conectado y si hay información disponible para recibir. Se almacena en una variable local el paquete de datos entrante, para después ser comparada y ejecutar la instrucción correspondiente ya sea incrementar o disminuir de uno en uno la posición del selector correspondiente. Este proceso es el mismo para cada par de botones.

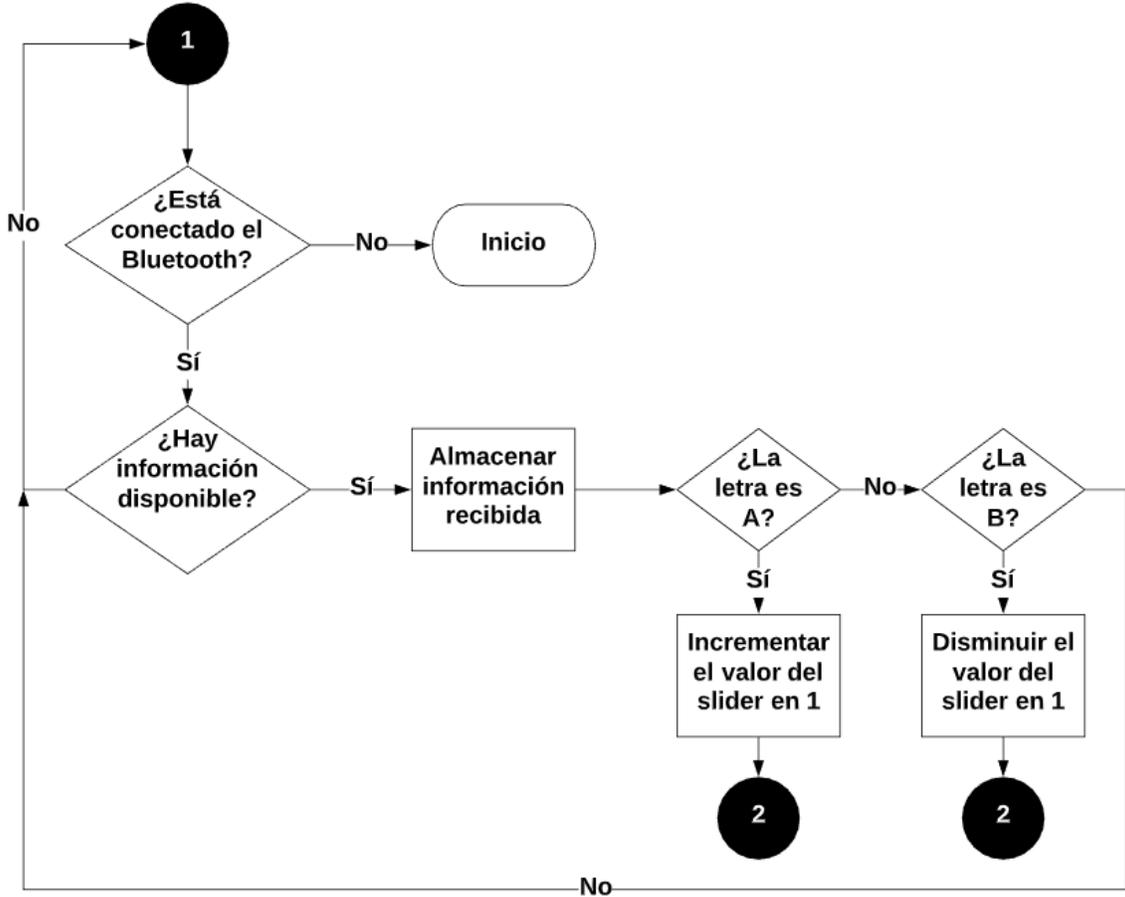


Ilustración 3.26 Diagrama de flujo del bloque de recepción en la aplicación.

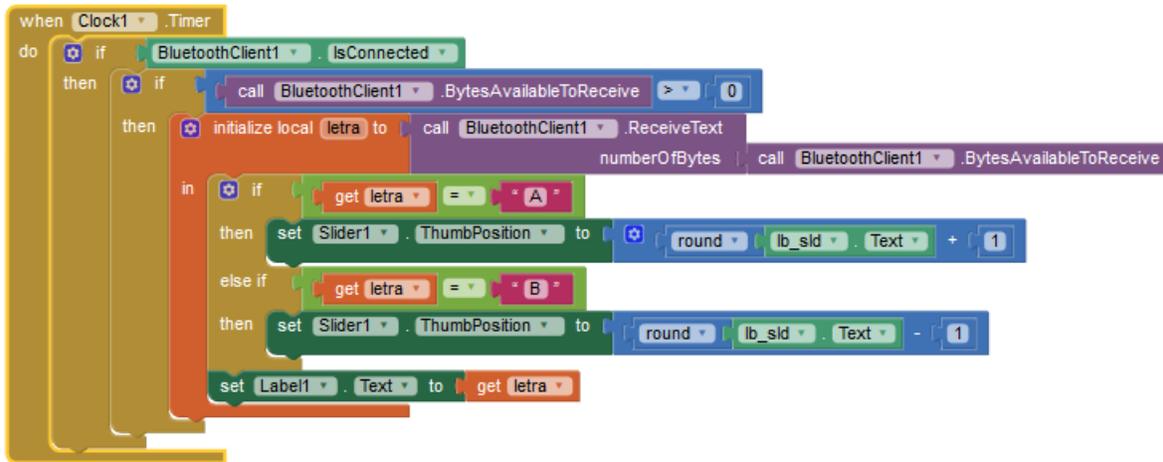


Ilustración 3.27 Bloque de recepción de información.

3.3.3 Transmisión de las señales de control

Controlar los potenciómetros digitales es posible mediante el envío de señales de control por parte de la aplicación. La información que permite la manipulación de los valores resistivos es el número entero que representa el estado de cada slider, sin embargo, dado que cada selector cuenta con valores dentro de un mismo intervalo (0 a 99), se pensó en una manera para lograr que el microcontrolador fuera capaz de diferenciar entre un selector y otro.

Dicha problemática se resolvió con 4 bloques que transmiten una cadena de texto, que contiene los valores de los cuatro selectores cuando cualquiera de ellos cambia de posición. Cada valor es separado por comas (,) y al final un salto de línea “\n”. Al enviar la información de esta manera será más fácil durante la recepción de datos en el microcontrolador, separar los valores para hacerlos independientes y así colocar cada valor en su respectivo potenciómetro.

Se implementó el diagrama de flujo de la ilustración 3.28 para la ejecución de los bloques de la ilustración 3.29. Adicionalmente se agregó un diagrama de bloques de la comunicación bidireccional del sistema en la ilustración 3.30.

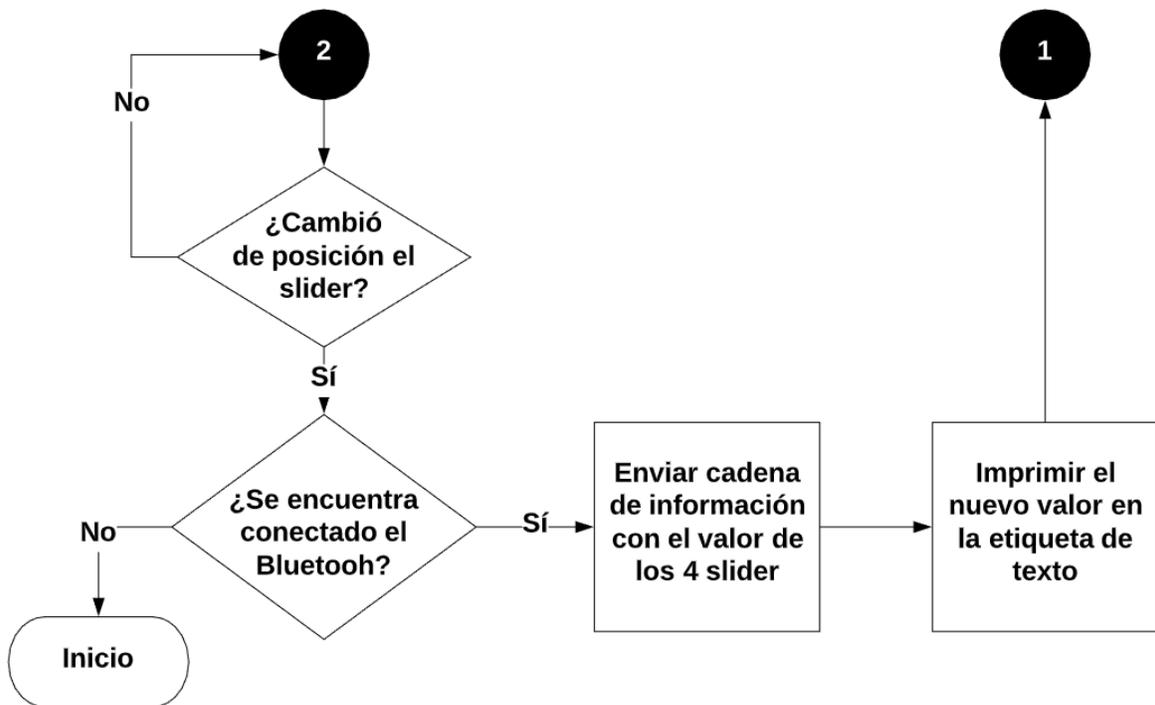


Ilustración 3.28 Diagrama de la transmisión de la información.

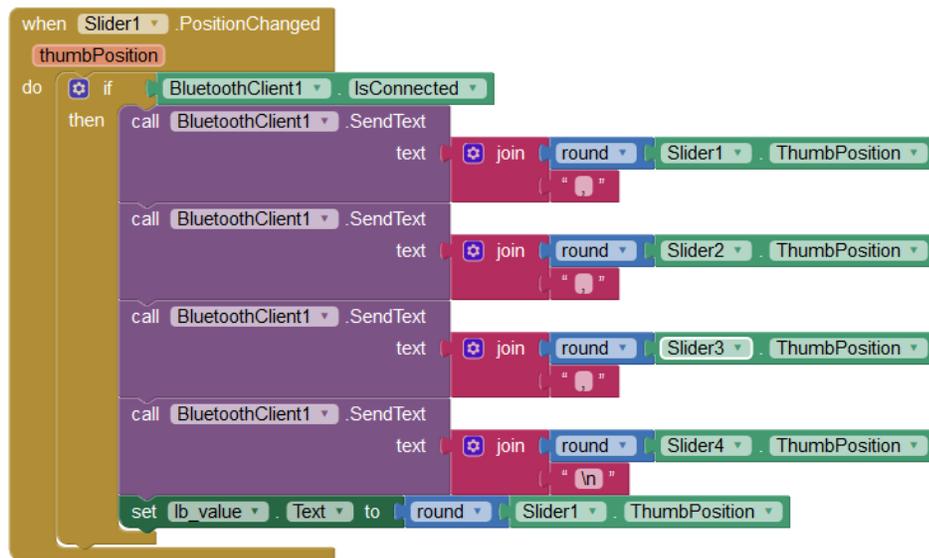


Ilustración 3.29 Bloque de instrucciones cuando un selector cambia de posición.

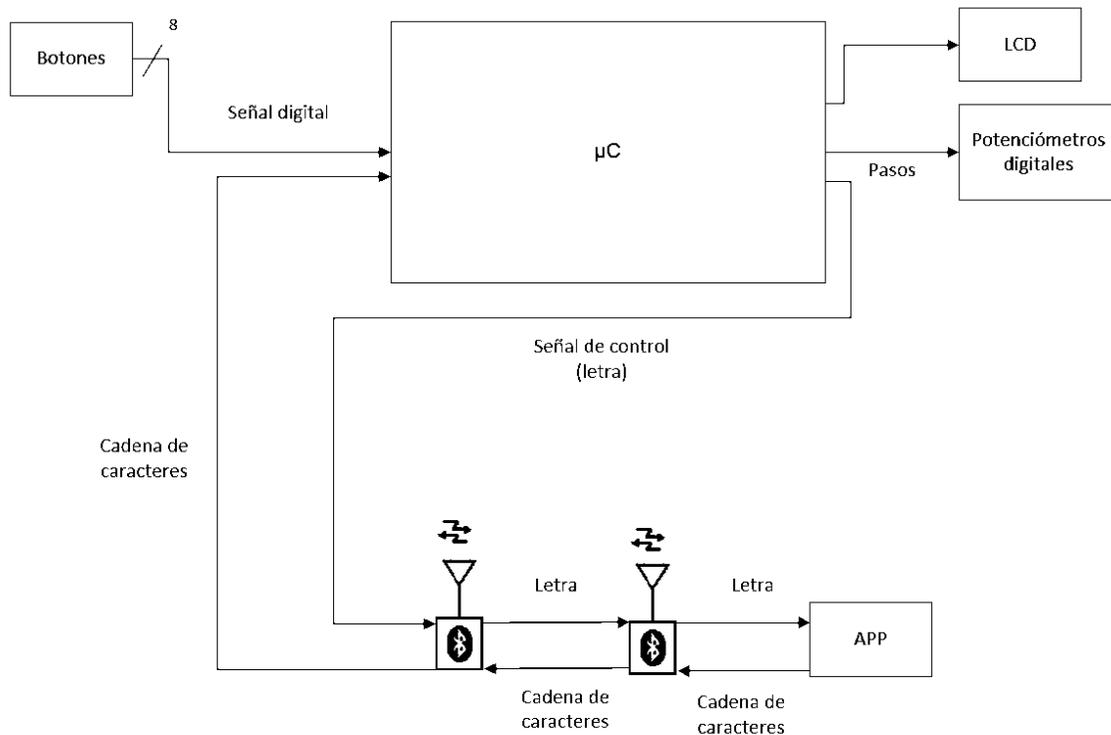


Ilustración 3.30 Diagrama de bloques de la comunicación bidireccional.

3.4 Programación de Arduino

En la ilustración 3.31 es representado el esquemático de las conexiones hechas en Arduino Mega. A pesar de que una de las ventajas que ofrece el amplificador es que puede ser manipulado de manera inalámbrica, se enfrentó la problemática de que sin un dispositivo Android, el sistema quedaría muy limitado, pues ya no se podrían hacer cambios en los potenciómetros, porque estos son efectuados únicamente cuando existe un enlace Bluetooth establecido con la aplicación del amplificador. Entonces, si por cualquier motivo el usuario no tuviese disponible un equipo Android, su amplificador no podría usarse de manera óptima. Para resolver dicho aspecto, se agregó un interruptor tipo toggle el cual hace posible escoger entre un modo convencional y un modo inalámbrico.

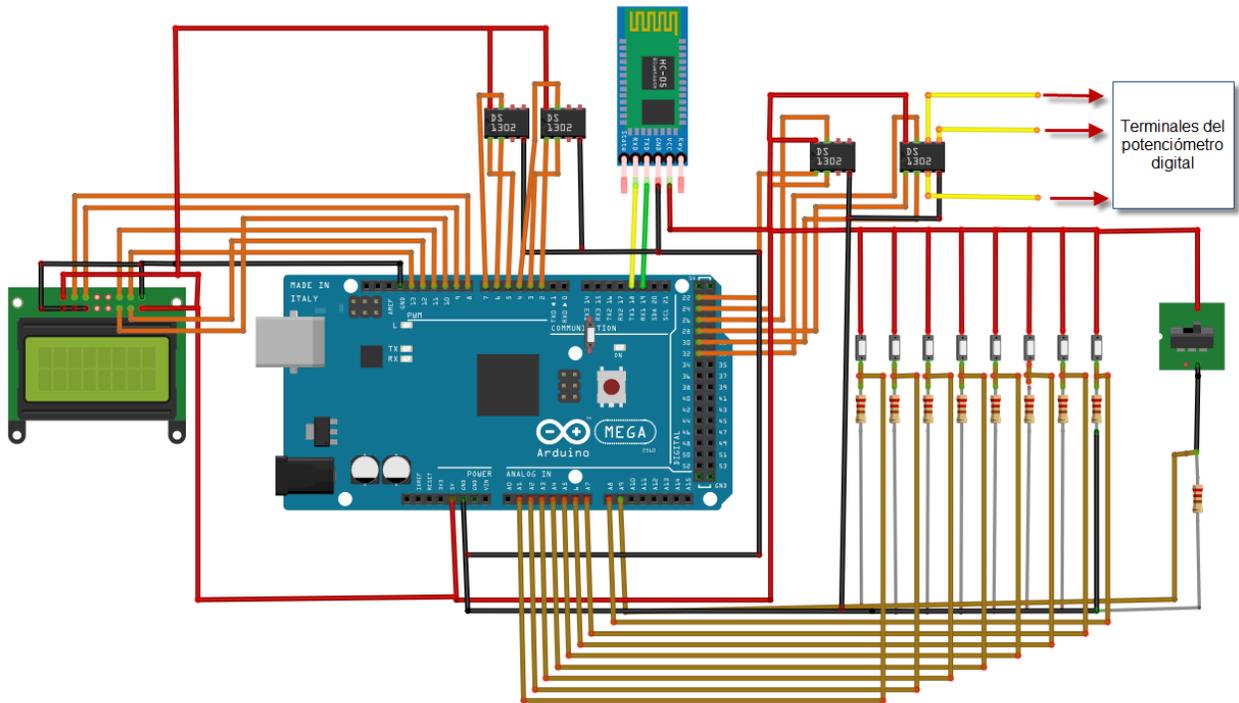


Ilustración 3.31 Esquemático de conexiones de la etapa de control digital.

El desarrollo en el entorno de Arduino IDE comienza incluyendo las bibliotecas a utilizar, en este caso son 2: LiquidCrystal para manipular la pantalla LCD y DigiPotX9Cxxx que nos permitirá controlar los potenciómetros digitales.

La configuración de pines como entrada o salida, la inicialización de los potenciómetros con 99 pasos y la configuración del mensaje a mostrar en el LCD, así como la selección de la velocidad de transmisión de la comunicación serial, es realizada en el void setup del código.

Posteriormente, en el void loop, simplemente se evalúa el estado del pin A9 declarado como entrada, donde es conectado el interruptor, con el que se puede escoger entre el modo convencional o el modo inalámbrico. Si el pin se encuentra en estado alto, se llamará a una función de nombre alámbrico, si es lo contrario, se llamará a una función de nombre inalámbrico.

A continuación, se mostrará en la ilustración 3.32 el diagrama de flujo correspondiente a lo redactado anteriormente.

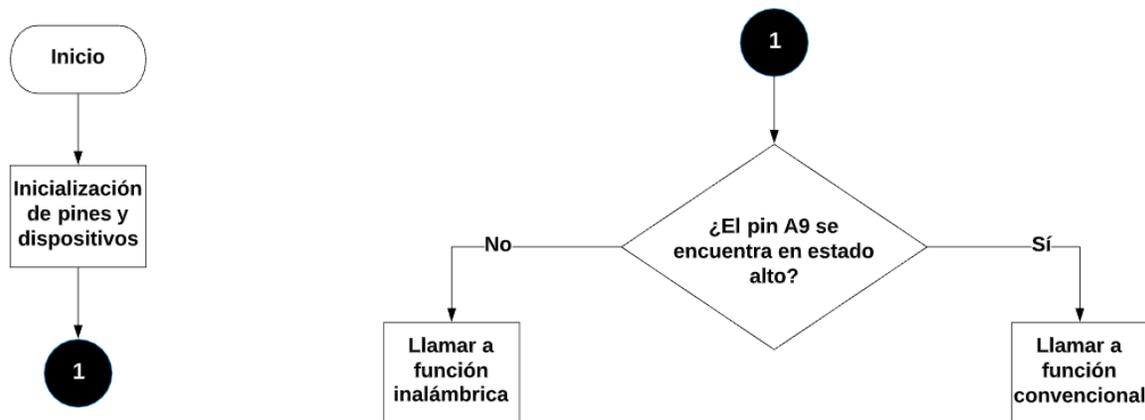


Ilustración 3.32 Diagrama de flujo del programa principal.

3.4.1 Función convencional

En esta función se emplearon los 8 botones, cada uno con su respectivo nombre para identificarlos (botón 1, botón 2, botón 3), cada potenciómetro igualmente con su respectivo nombre, es manipulado por dos botones, uno de ellos incrementará el valor resistivo y el otro lo disminuirá. Y para ello, en 8 variables de tipo boolean se guarda el estado lógico de cada botón los cuales se encuentran conectados a una resistencia de pull down. Entonces al presionar un botón se obliga a conmutar al pin correspondiente de estado bajo a estado alto. De esta manera, el Arduino puede identificar exactamente qué botón se presionó y así toma el valor actual de determinado potenciómetro para incrementarlo o disminuirlo en 1 como se muestra en el diagrama de flujo de la ilustración 3.33.

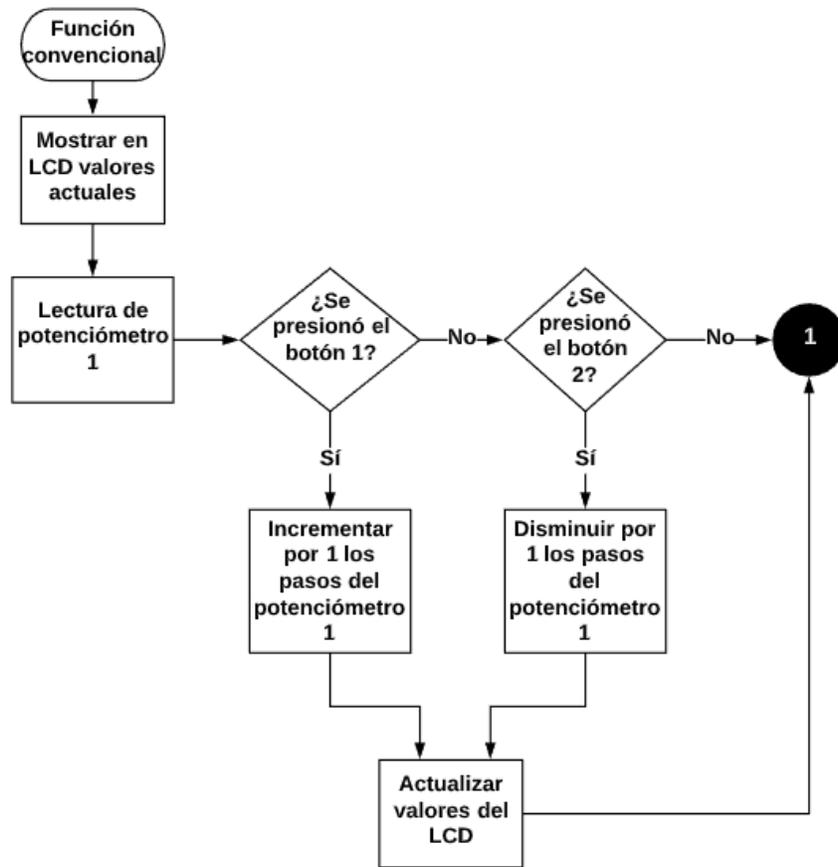


Ilustración 3.33 Diagrama de flujo del modo convencional.

3.4.2 Función inalámbrica

Gracias a que el Arduino Mega cuenta con 4 puertos seriales UART (TX0 RX0, TX1 RX1, TX2 RX2, TX3 RX3), se emplearon dos de ellos (TX0 RX0 y TX1 RX1) para lograr la comunicación bidireccional. Ambos fueron inicializados a una velocidad de transmisión de 9600 baudios en el void setup. Y mediante estos dos puertos seriales fue posible crear un puente de comunicación entre el Arduino y el dispositivo Android.

El módulo Bluetooth HC-05 es conectado al puerto serial 1 del Arduino Mega. Mientras exista información disponible en este puerto, es decir, si se están recibiendo datos, se utiliza la instrucción “Serial.parseInt()” del entorno de Arduino para almacenar la información en 4 diferentes variables. Esta instrucción busca números enteros en el buffer del puerto, cuando aparezca una coma (,) al no ser un número entero, no puede ser identificada por esta instrucción y es por eso que la información enviada por la aplicación Android se transmite separada por comas, y al final como señalización, un salto de línea “\n” que le haga saber al

microcontrolador que la cadena de texto ha terminado. Al detectar el salto de línea, la información guardada en las 4 variables anteriores es colocada en el potenciómetro digital correspondiente y dichos valores son plasmados en el LCD.

Para la transmisión de información, se evalúa la cantidad de bytes disponibles en el puerto serial 0, si el número de bytes es igual a cero, lo que quiere decir que el usuario será quien coloque la información. En seguida los pines donde se encuentran conectados los botones son leídos y al presionar alguno de ellos, será transmitido por el puerto serial 1 una señal de control que contenga una letra. Posteriormente, la aplicación Android recibirá dicha información, hará que un slider cambie de posición y cada que cualquiera cambia de posición, se enviará una nueva cadena de texto, la cual recibirá el Arduino y situará el nuevo valor en el potenciómetro que corresponda. En el diagrama de flujo de la ilustración 3.34.

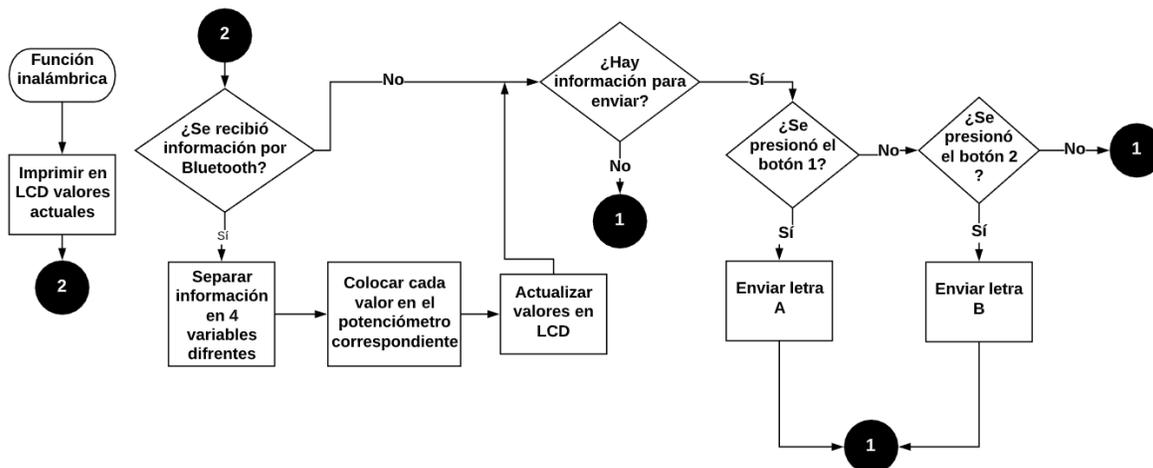


Ilustración 3.34 Diagrama de flujo del modo inalámbrico.

3.5 Amplificador de potencia.

Para construir la etapa de amplificación de potencia (ilustración 3.35), se requiere de un circuito que este adaptado a las necesidades del proyecto, por lo tanto, los componentes resistivos y capacitivos se tienen que calcular por medio de ecuaciones que definen las características del sonido en el amplificador.

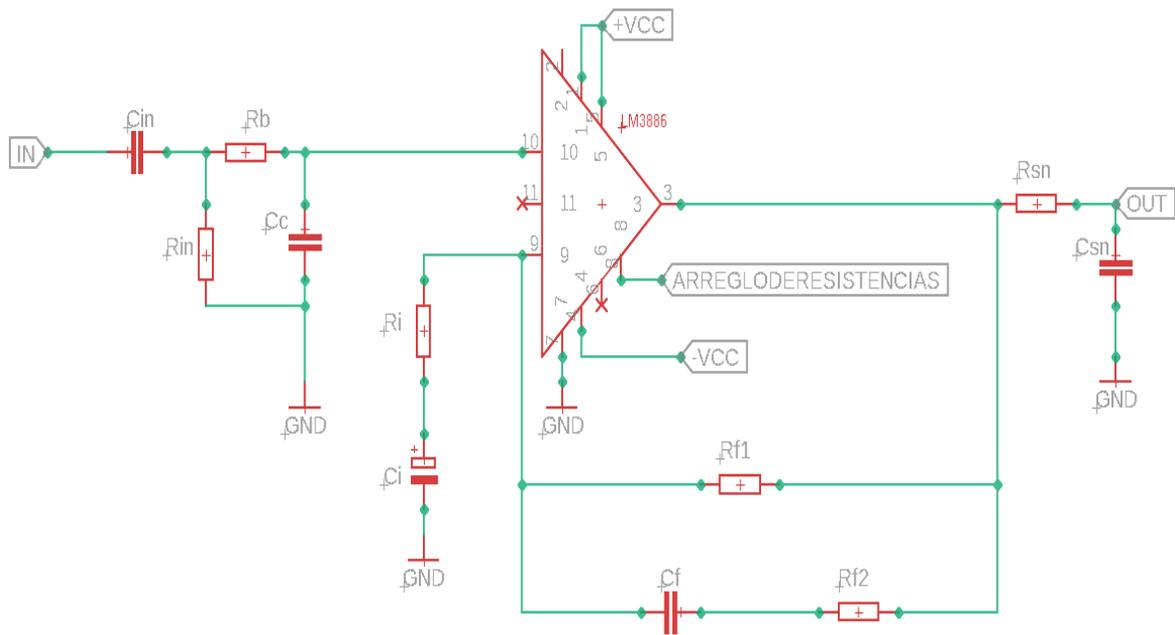


Ilustración 3.35 Diagrama del circuito amplificador de potencia

3.5.1 Ganancia

Para definir la ganancia del amplificador se utilizó la ecuación 2.7, contemplando que se desea una potencia de salida de 50 W, que se utiliza una bocina de 8Ω y entra $1 V_{RMS}$, esta operación definió una ganancia de 20 y con la ecuación 2.5 se comprobó que hay una ganancia de 26 dB; de acuerdo a la recomendación de “Circuit Basics” se debe mantener entre 27 dB y 30 dB. Para calcular el valor de la resistencia R_{f1} se utilizó la ecuación 2.8, tomando un valor de R_i de $1 K\Omega$ y una ganancia de 28 porque de acuerdo a la ecuación 2.5 en decibeles da 29, por la tanto se encuentra dentro del rango deseado, con estos valores la operación dio como resultado una resistencia de $27 K\Omega$.

3.5.2 Equilibrio de corriente

Como las resistencias R_{in} y R_b al sumarse deben aproximarse al valor de R_{f1} a R_{in} se le dio un valor de $26 K\Omega$ y a R_b un valor de $1 K\Omega$.

3.5.3 Capacitor de acople

Para obtener el valor de C_{in} se utilizó la ecuación 2.8, el valor de R_{in} y una frecuencia de corte de 6 Hz.

3.5.4 Límite de frecuencias bajas en la red de retroalimentación.

El valor de C_i se obtuvo con la ecuación 2.9, utilizando los componentes ya antes calculados y se calculó un valor de $3.8 \mu\text{f}$ y con la ecuación 2.10 se corroboró que la frecuencia de corte sea por lo menos 3 veces más pequeña que la que se ocasiona en el capacitor de acople, la ecuación da como resultado 42 Hz y por la tanto se buscó un valor más grande de C_i hasta que se ajustó a la frecuencia de corte deseada, por la tanto el valor de C_i es de $100 \mu\text{f}$, comprobando la frecuencia de corte con la ecuación 2.10 se corrobora que los valores son los deseados, con una frecuencia de 1.6 Hz que es 3.8 veces más pequeña que la producida por el capacitor de acople.

3.5.5 Límite de frecuencias altas en el amplificador.

Para el valor de C_c se utiliza el recomendado por “Circuit Basics” de 680 pf .

3.5.6 Componentes de estabilidad en la red de retroalimentación.

Para los valores de R_{f2} y de C_f se utilizan los recomendados por “Circuit Basics” de $20 \text{ K}\Omega$ y 50 pf respectivamente.

3.5.7 Red de Zobel.

Para la red de Zobel se utilizó un valor de R_{sn} de 15Ω y un valor de C_{sn} de 220nf y con la ecuación 2.11 se comprobó que la frecuencia de corte este por arriba de la frecuencia máxima que puede escuchar el humano y por debajo de las frecuencias electromagnéticas no deseadas.

3.5.8 Control de mute.

Para encontrar la resistencia máxima que se puede tener en el pin ocho se utilizó la ecuación 2.12 con un voltaje de entrada de 25, dando como resultado una resistencia de $44.8 \text{ K}\Omega$, por lo tanto, el arreglo de resistencias en el pin ocho tiene que ser menor que el valor calculado.

En la tabla 3 se pueden observar todos los componentes y sus valores.

Tabla 3-1 Valores de los componentes del amplificador de potencia.

Resistencias		Capacitores	
$R_{f1} = 27\text{ K}\Omega$	$R_i = 1\text{ K}\Omega$	$C_{in} = 1\mu\text{f}$	$C_f = 50\text{pf}$
$R_b = 1\text{ K}\Omega$	$R_{in} = 26\text{ K}\Omega$	$C_i = 100\mu\text{f}$ electrolítico	$C_{sn} = 200\text{nf}$
$R_{f2} = 22\text{ K}\Omega$	$R_{sn} = 5\Omega$ a 5W	$C_c = 680\text{ pf}$	

En la ilustración 3.36 se muestra el esquema del circuito con las resistencias y capacitores necesarios para aproximarse a los valores calculados, el arreglo de resistencias en el pin ocho para limitar el flujo de corriente, el conector JRSTPH para poder controlar la ganancia y sus respectivas terminales.

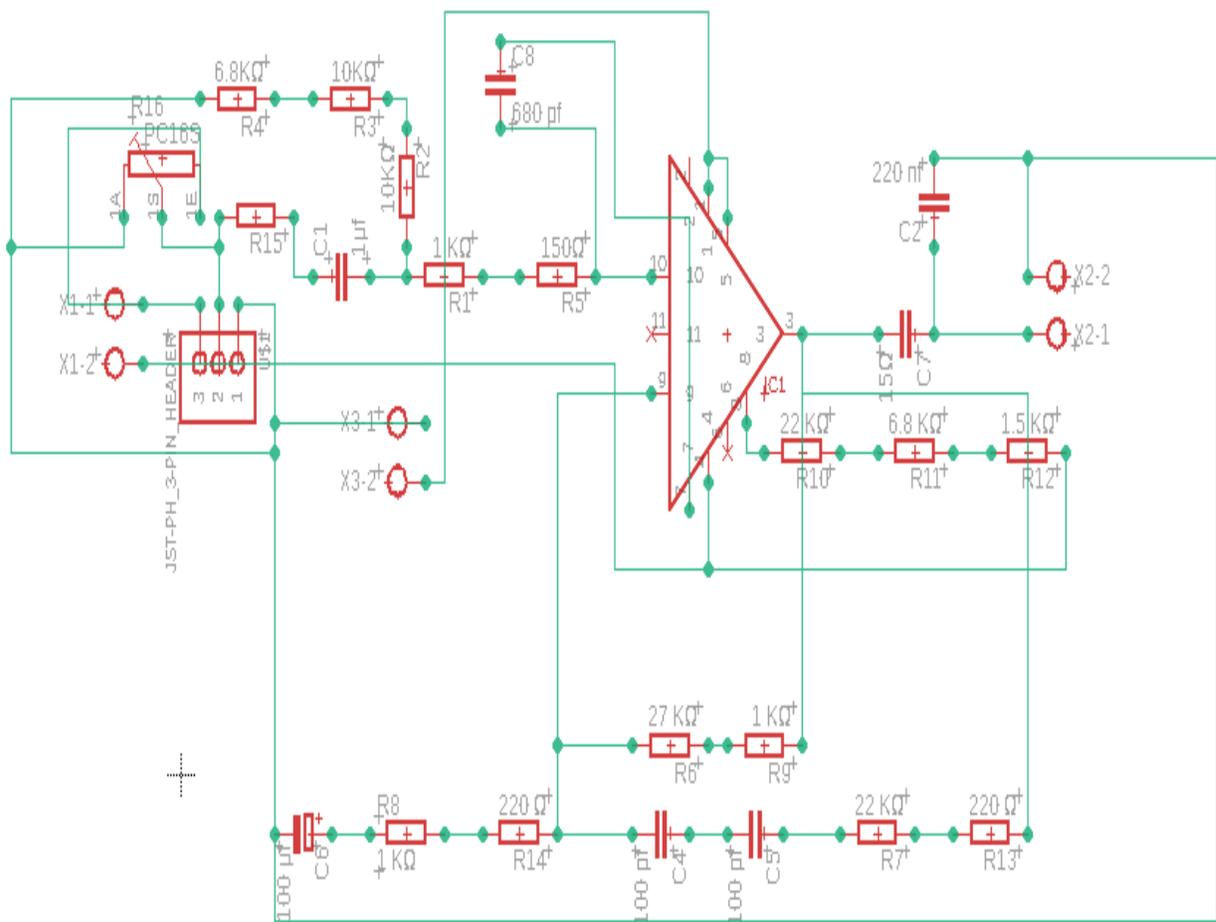


Ilustración 3.36 Diagrama del amplificador de potencia.

En la ilustración 3.37 se muestra la PCB de una sola cara del amplificador de potencia.

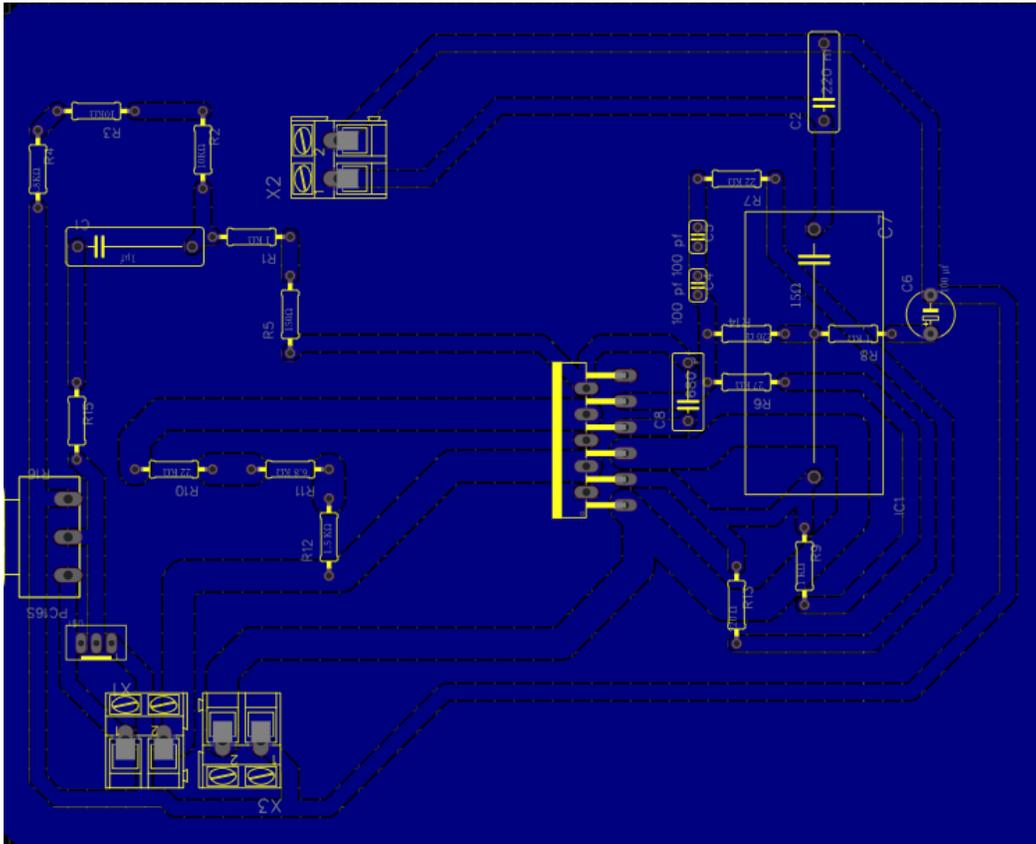


Ilustración 3.37 PCB del amplificador de potencia.

3.6 Fuente de alimentación.

La fuente de alimentación (ilustración 3.38) se diseñó con base a la potencia necesaria para alimentar todos los componentes del amplificador, debido a que el amplificador de audio es de 50 W, la fuente se contempló que tuviera una potencia de 60 W. Se requieren diferentes salidas de voltaje; se optó por tomar las salidas de voltaje del bobinado secundario y se rectificaron para que pudieran alimentar los diferentes dispositivos, por lo tanto, se tiene una salida de $\pm 16 V_{DC}$ para alimentar la etapa de filtrado y control de ganancia, una de $9 V_{DC}$ para alimentar la etapa de control y una de $\pm 23 V_{DC}$ para alimentar la etapa de potencia.

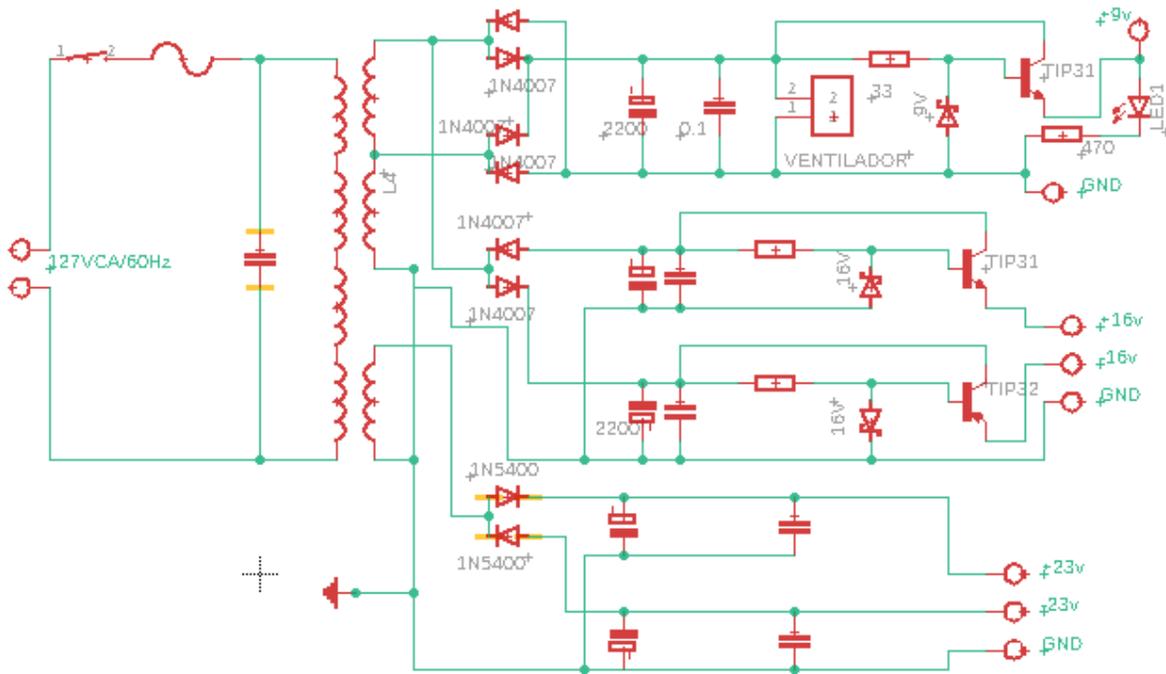


Ilustración 3.38 Esquema de la fuente de alimentación.

3.7 Desarrollo del prototipo.

Para obtener el prototipo primero se diseñó una caja de acrílico con las medidas y cortes necesarios para que todas las etapas pueden ser introducidas. Una vez que la caja fue construida se marcaron los hoyos que se tenían que realizar para que cada etapa pudiese ser sujeta a la caja (ilustración 3.39).

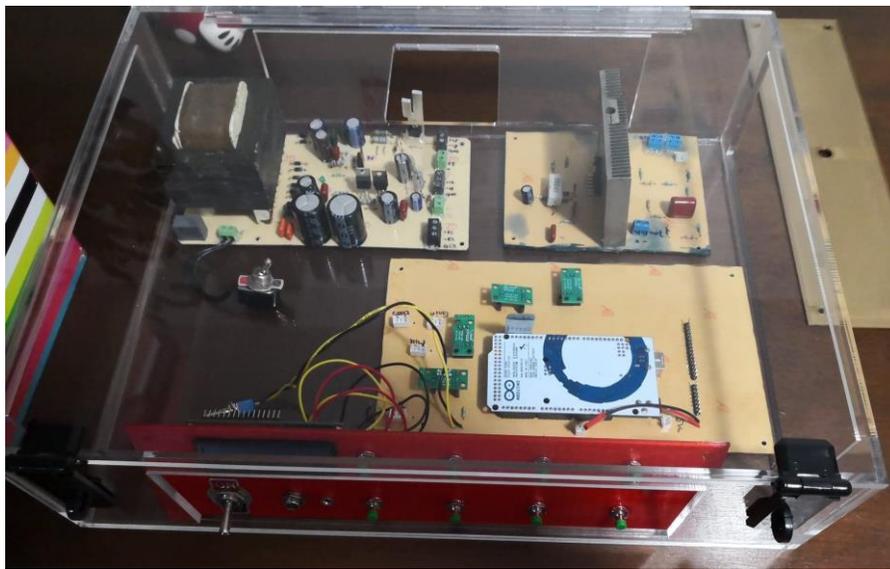


Ilustración 3.39 Marcando las perforaciones.

Para mantener el prototipo lo más presentable posible se decidió utilizar papel batería para crear un suelo, el cual tiene ciertos cortes para poder pasar los cables por debajo de él y que estos no se vean. El acrílico se perforo junto con el suelo de papel batería para que los tornillos pudieran sujetar las distintas etapas (Ilustración 3.40).

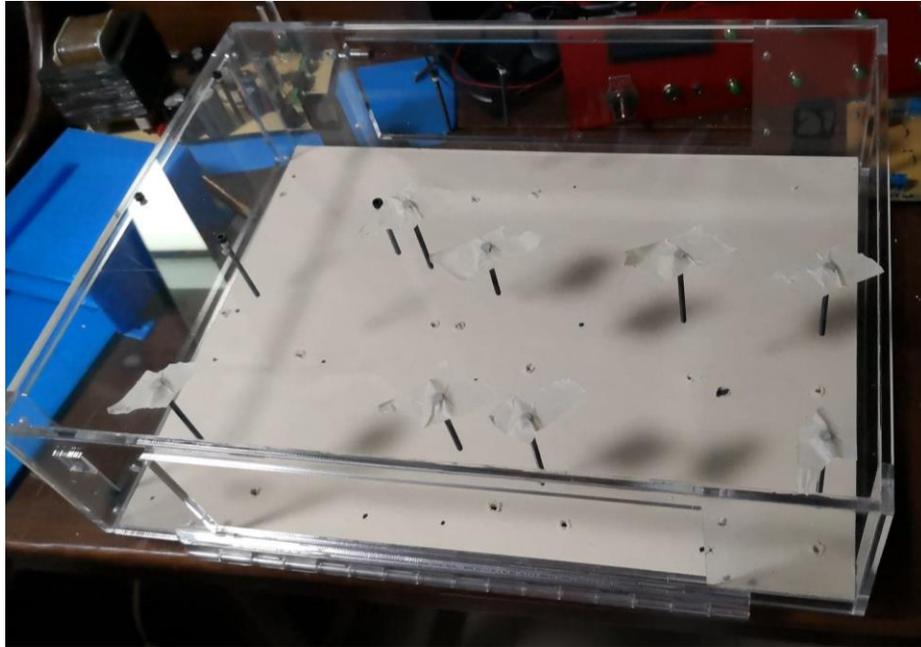


Ilustración 3.40 Perforaciones realizadas.

Se diseñó cada pieza en 3D y se colocó en la caja, se atornillo un ventilador y un asa (ilustración 3.41).

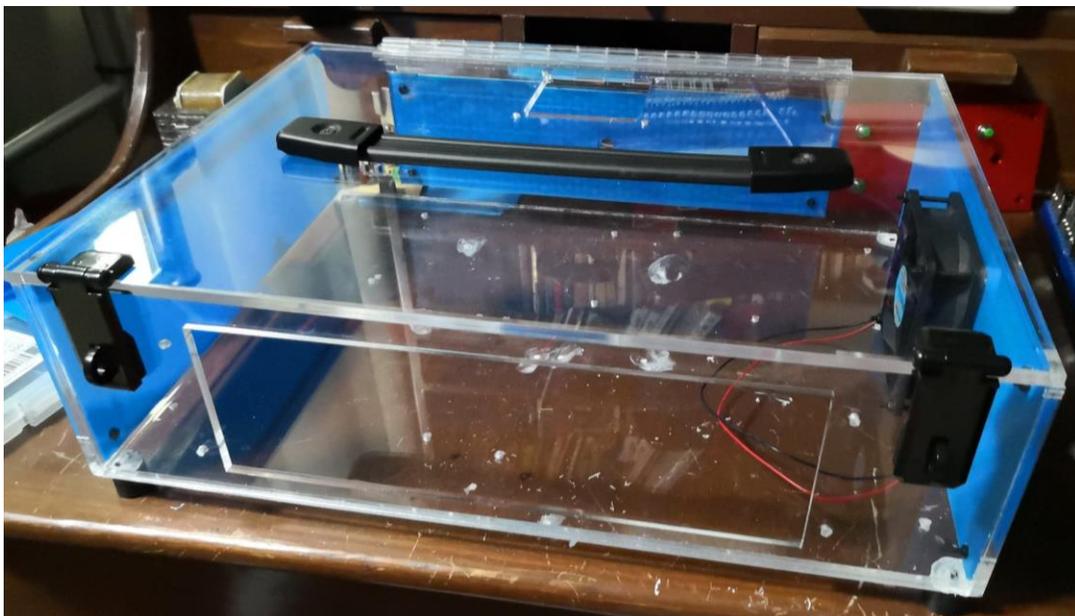


Ilustración 3.41 Instalación de ventilador, asa y piezas 3D.

Se instaló el último ventilador y se colocó el papel batería, se pasaron los cables por debajo del papel y se atornilló la etapa de potencia y la de alimentación (ilustración 3.42).

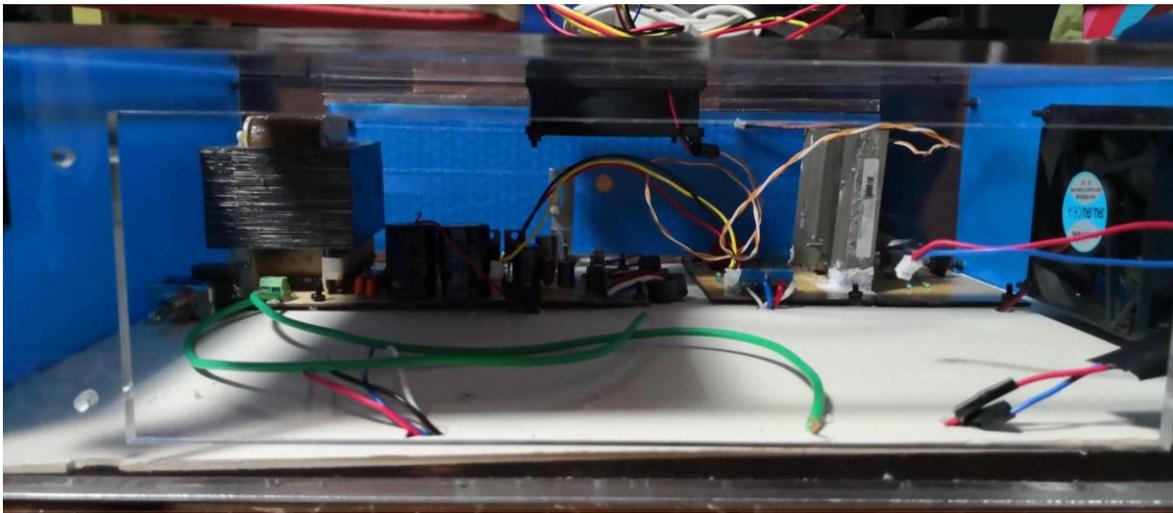


Ilustración 3.42 Instalación de suelo, etapa de potencia, de alimentación y ventilador y acomodo de cables.

Se ensamblaron todas las etapas faltantes y se instaló una pieza en 3D que sirve para administrar mejor el espacio (ilustración 3.43).

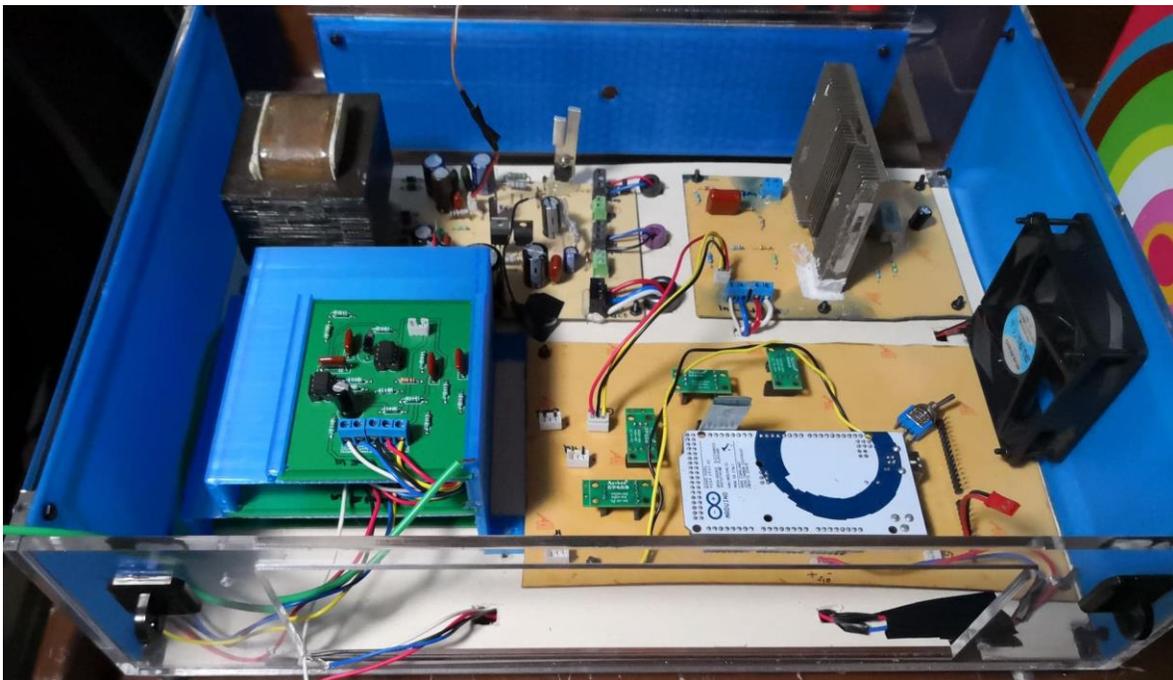


Ilustración 3.43 Instalación de las últimas etapas.

Se terminó de ensamblar las piezas en la caja de acrílico (ilustración 3.44) y se comprobó que todas las etapas funcionaran correctamente.

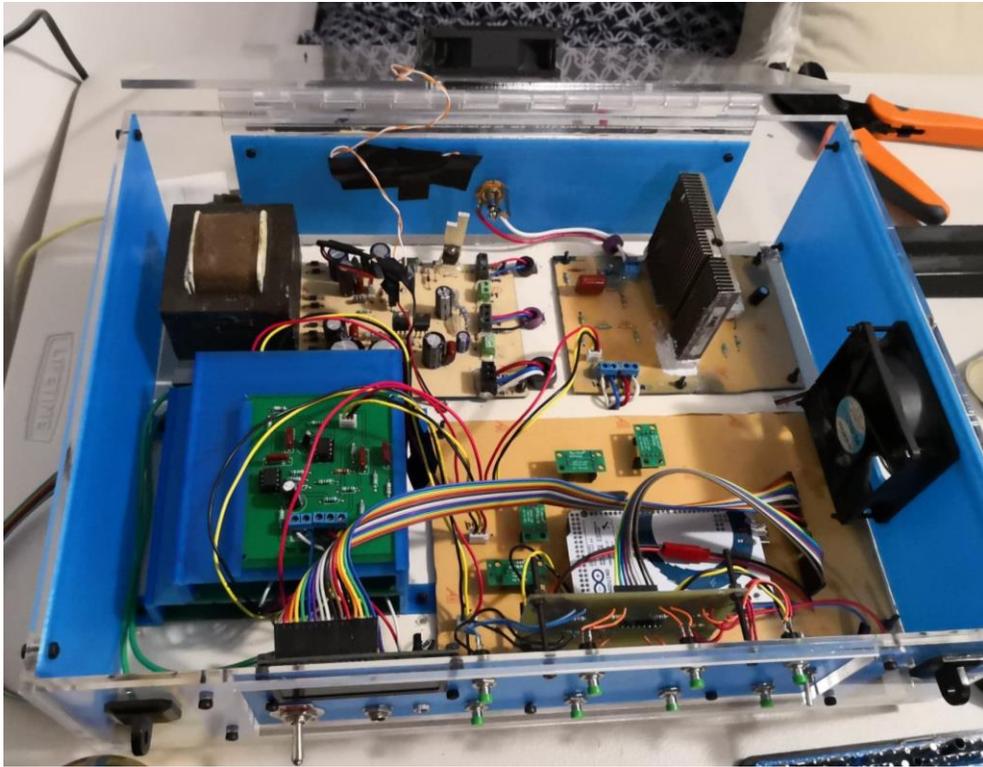


Ilustración 3.44 Proyecto finalizado.

4 Pruebas y resultados

Para poder llegar a un resultado satisfactorio en el desempeño del amplificador de guitarra, se realizaron pruebas a cada etapa del proyecto las cuales serán descritas en los próximos apartados, para algunas de estas pruebas fue necesario el uso de material de laboratorio.

4.1 Pruebas iniciales de la etapa de control digital

Al inicio del proyecto se tenía planeado realizar la etapa de control con un Arduino nano y representar los valores de los potenciómetros digitales utilizando display de 7 segmentos.

Las pruebas iniciales fueron realizadas con el circuito de la ilustración 4.1 en donde únicamente se utilizó un potenciómetro digital y un display de 7 segmentos. Las órdenes eran transmitidas por la aplicación mostrada en la ilustración 4.2 que consistía en dos botones que incrementaban o decrementaban un contador que iba de 0 a 9. Cada valor del contador era transmitido vía Bluetooth (ilustración 4.3) y recibido por el Arduino que con ayuda de la función “map”, en una nueva variable de nombre “paso”, se establecía una relación entre el intervalo de 0 a 9 que son los valores numéricos transmitidos por la aplicación y el intervalo de 0 a 99 que son la cantidad de pasos con los que cuenta el potenciómetro digital, posteriormente este valor era colocado en el potenciómetro digital. Es importante señalar que la información recibida en Arduino es de tipo “string” por lo que se debe convertir a “int” para poder ser utilizada en la función “map” (ilustración 4.4).

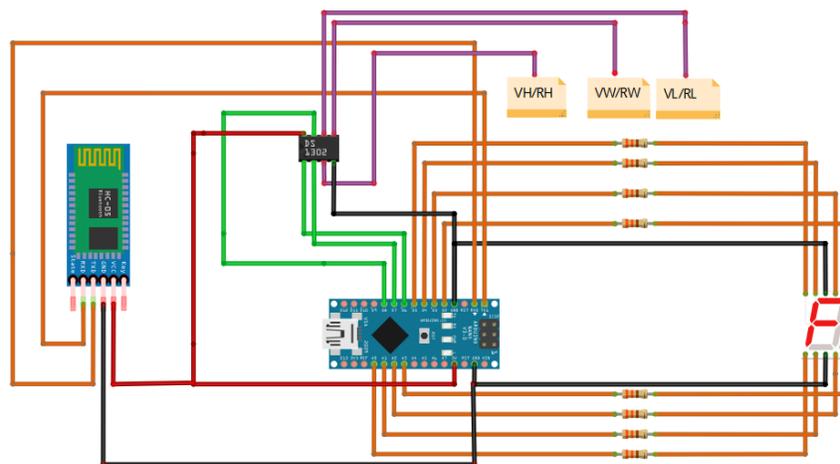


Ilustración 4.1 Pruebas con Arduino nano.



Ilustración 4.2 Versión inicial de la aplicación.

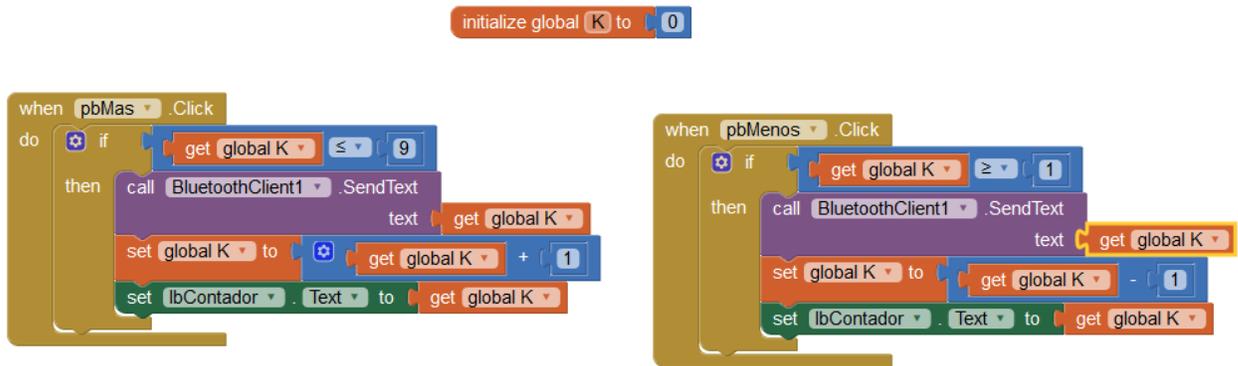


Ilustración 4.3 Conjunto de bloques de la versión inicial de la aplicación

```

int convertido = String(app).toInt();
int paso = map(convertido, 0, 9, 0, 99);
Serial.println(paso);
pote.set(paso);

```

Ilustración 4.4 Código de recepción en Arduino.

Se realizó un divisor de tensión conectando la terminal VL/RL a tierra, la terminal Vh/Rh a una fuente de 5 V y el voltaje fue medido de Vw/Rw a tierra, con la finalidad de verificar si el potenciómetro estaba sufriendo cambios resistivos en sus terminales. Los resultados de las mediciones se muestran en la tabla 4-1.

Tabla 4-1 Resultados de las mediciones del divisor de tensión

Numero en el display	Voltaje [V]
0	0
1	.53
2	1.08
3	1.62
4	2.17
5	2.72
6	3.27
7	3.82
8	4.38
9	5.01

La aplicación anterior (ilustración 4.2) funcionaba, sin embargo, se decidió cambiar los botones por un slider (con un intervalo de 0 a 10) como se muestra en la ilustración 4.5, para que el usuario pueda realizar de manera más cómoda los cambios sin necesidad de estar presionando botones en repetidas ocasiones.

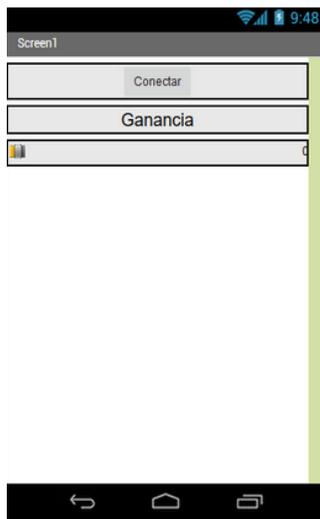


Ilustración 4.5 Segunda versión de la aplicación.

Para estas pruebas se logró manipular un potenciómetro digital de manera inalámbrica, sin embargo, pronto se hizo evidente que la cantidad de pines de entrada y salida de un Arduino nano no serían suficientes, entonces se optó por realizar esta etapa con un Arduino Mega que cuenta con la suficiente cantidad de pines de entrada y salida para cubrir con las necesidades del proyecto. Adicionalmente también se cambiaron los display de 7 segmentos por una pantalla LCD para ahorrar más pines. Por otro lado, los resultados de la tabla 4-1 demuestran que no se está aprovechando al máximo el potenciómetro digital ya que sólo se están usando 10 de los 100 valores resistivos que el dispositivo ofrece. Por lo que cada slider debería enviar valores del 0 al 99 para obtener la totalidad de cambios en el potenciómetro digital.

4.2 Modificaciones a la aplicación

Las modificaciones hechas en la aplicación (ilustración 4.6) consisten únicamente en agregar los sliders faltantes inicializados en su valor máximo, igualmente se cambió el color de fondo a negro con la finalidad de hacerlo más cómodo para la vista y se cambió el intervalo en el valor de los slider, que anteriormente estaba establecido de 0 a 9 y ahora es de 0 a 99 (ilustración 4.7).



Ilustración 4.6 Versión final de la aplicación.

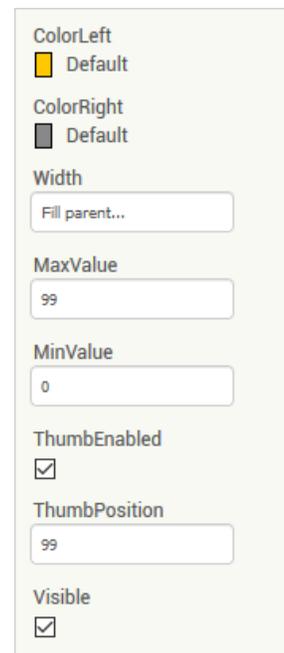


Ilustración 4.7 Configuración de cada slider.

4.2.1 Transmisión de información de la aplicación

Para verificar que la información transmitida del celular al microcontrolador se esté efectuando de manera adecuada, se utilizó el monitor serial proporcionado por la IDE de Arduino y mediante el código mostrado en la ilustración 4.8, se obtuvo la siguiente cadena de texto (ilustración 4.10) al mover cualquiera de los sliders que conforman la aplicación (ilustración 4.9).

```
void setup() {  
  Serial.begin(9600);  
  
}  
  
void loop() {  
  if(Serial.available() > 0)  
  {  
    char c = Serial.read();  
    Serial.print(c);  
  }  
  
}
```

Ilustración 4.8 Código de prueba.

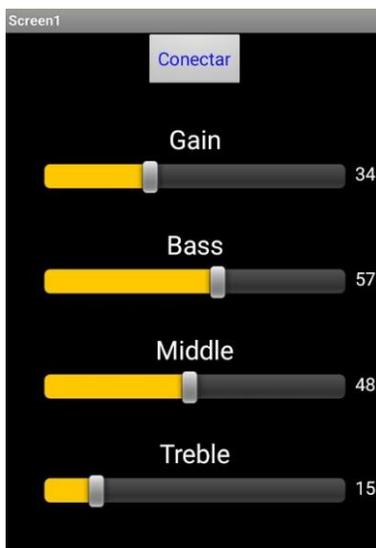


Ilustración 4.9 Manipulación de los Sliders.

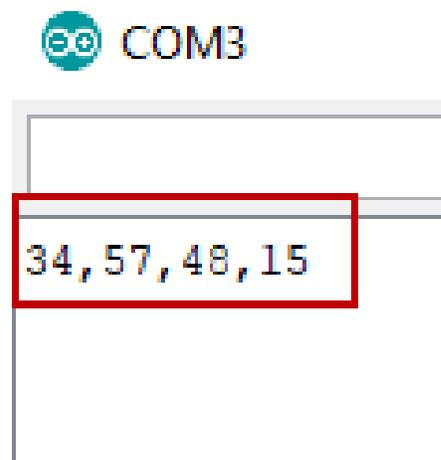


Ilustración 4.10 Valores recibidos en Arduino.

En las imágenes anteriores se prueba que cada vez que un slider cambia de posición, se envía una cadena de texto con los valores de cada uno de los sliders separados entre sí por una coma (,).

4.2.2 Recepción de información en la aplicación

Se realizó una prueba para determinar si el microcontrolador efectivamente se encuentra transmitiendo las señales de control esperadas para establecer una comunicación bidireccional entre la tarjeta y la aplicación. Para ello, en la aplicación se añadió una etiqueta de texto en donde se podrán observar los caracteres que está recibiendo la aplicación por parte de Arduino al ser presionado alguno de los botones añadidos en sus pines de entrada, cada botón transmitirá una letra diferente y cada par de botones estará asociado a un slider (ilustración 4.11).

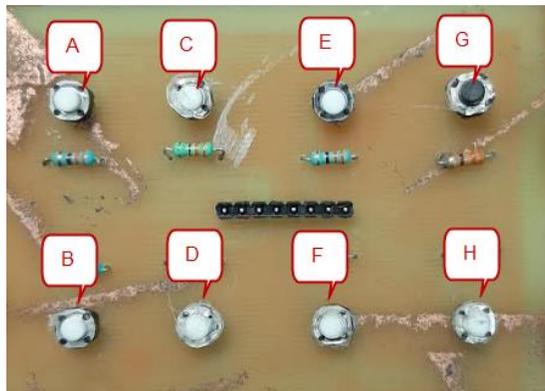


Ilustración 4.11 Botones.

En la ilustración 4.12 se puede ver la letra recibida “B” y el cambio en el slider que de estar en posición 99 cambia a posición 98 ya que al recibir la letra B se disminuye en 1 la posición del slider encargado de la ganancia (gain). Lo mismo sucede en la ilustración 4.13 pero en sentido inverso. Se recibe la letra A y el slider “Gain” cambia de 98 a 99.

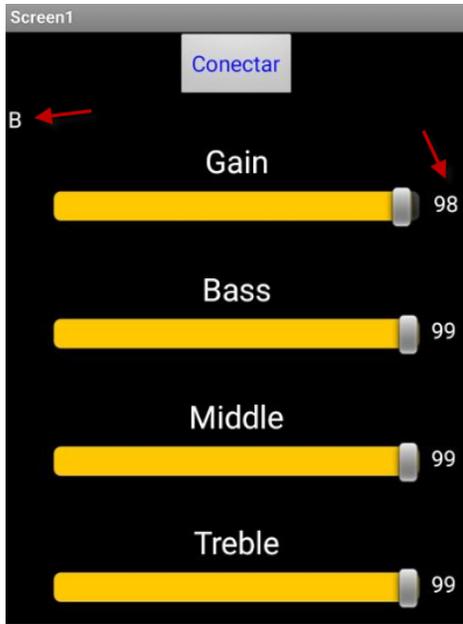


Ilustración 4.12 Letra B recibida en la aplicación.



Ilustración 4.13 Letra A recibida en la aplicación.

Realizando esta prueba, se encontró el detalle de que ocasionalmente, al presionar algún botón, el microcontrolador transmite dos veces la señal de control (ilustración 4.14), debido al ruido provocado por el rebote en los botones. Para solucionarlo, al bloque de recepción de información en la aplicación, se le añadieron instrucciones adicionales para incrementar o disminuir los slider aun cuando se reciba una señal de control repetida como se observa en la ilustración (4.15).

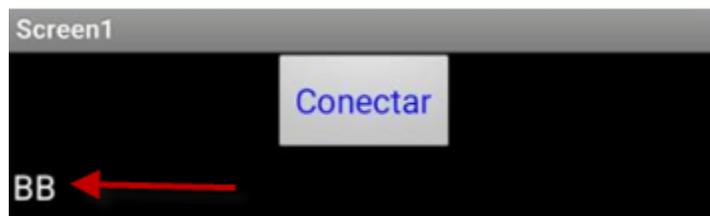


Ilustración 4.14 Señal de control repetida



Ilustración 4.15 Instrucciones adicionales para señales repetidas

4.2.3 Pruebas del LCD

Para comprobar que el LCD funcione correctamente, se realizó un experimento en donde se manipularon los valores de cada slider en la aplicación, obteniendo los resultados de la ilustración 4.16 en donde se observa que lo representado en el LCD es lo mismo que se muestra en la aplicación, ilustración 4.17.

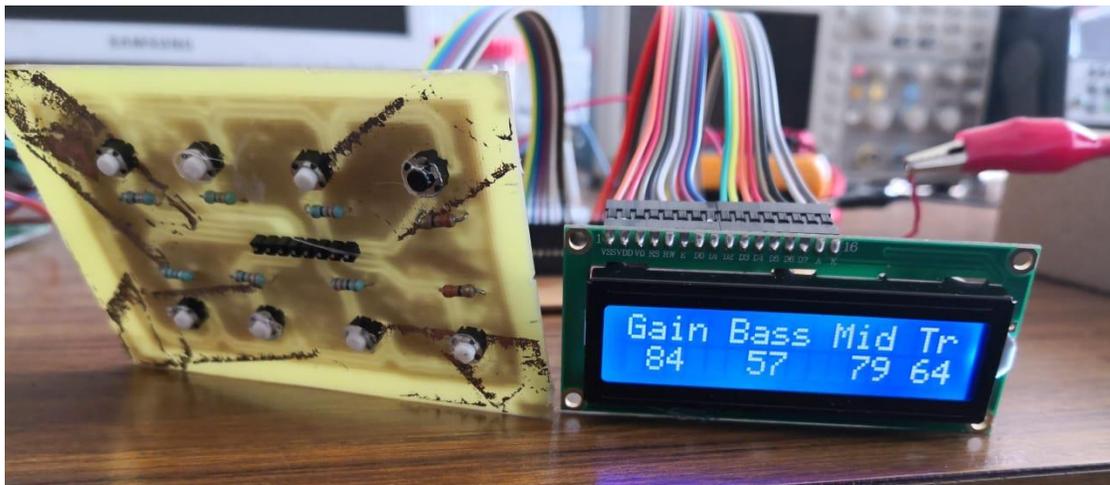


Ilustración 4.16 Valores mostrados en el LCD.

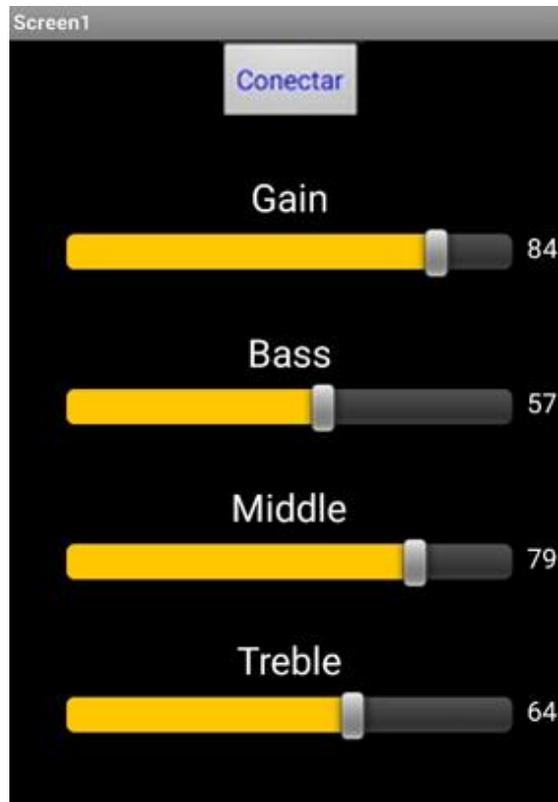


Ilustración 4.17 Valores mostrados en la aplicación.

4.3 Pruebas del potenciómetro digital

Se repitió el divisor de tensión para comprobar las variaciones resistivas en los potenciómetros digitales, pero ahora, al tratarse de 100 valores se elaboró una gráfica (ilustración 4.18) para mostrar los resultados obtenidos.

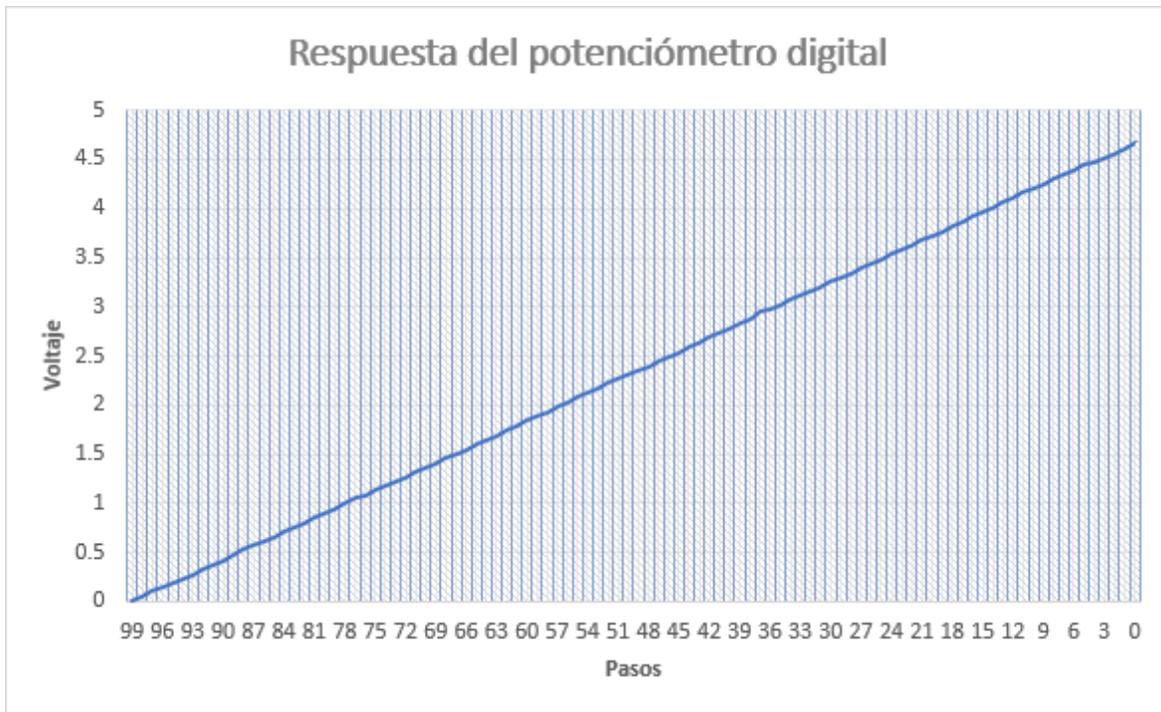


Ilustración 4.18 Respuesta del potenciómetro digital.

4.4 Pruebas realizadas a la etapa de ecualización de tres bandas y control de ganancia.

Al comienzo del proyecto se contempló la opción de utilizar filtros pasivos debido a que son mucho más fáciles de alambrear, mucho más económicos y el circuito resultante es más pequeño, para este propósito se utilizó el programa web “Tone Stack Calculator” (ilustración 4.19), con el cual tienes diferentes opciones de ecualización, según el programa, depende del tono que buscas en tu amplificador.

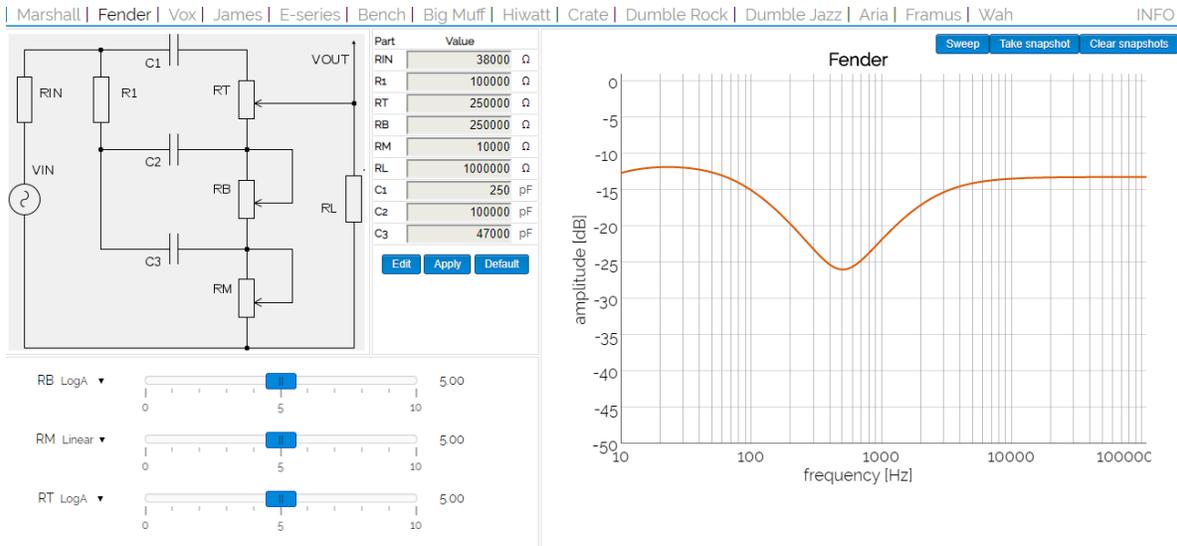


Ilustración 4.19 Tone Stack Calculator.

Se construyó un circuito con base a lo que determino el programa y se le realizaron pruebas de funcionamiento con las cuales se comprobó que no tenía el desempeño deseado, para funcionar correctamente necesitaba preamplificaciones por arriba de los 120dB y los potenciómetros digitales no funcionaban de manera correcta, ya que estos solo funcionan hasta 5_{DC} en su pin de entrada, por lo tanto, se realizó una amplia búsqueda para poder desarrollar un ecualizador de tres bandas activo, ya que estos pueden funcionar con voltajes más bajos, y se encontró el programa “Filter Design Tool” con el cual se experimentó y se alambro un filtro activo pasa bajas de cuarto orden, al cual se le realizaron pruebas de funcionamiento con el osciloscopio e introduciéndole una señal con el generador de funciones y se pudo comprobar que el filtro funcionaba de forma correcta, pero su desempeño filtrando las frecuencias altas todavía no era el deseado, por lo tanto, se fue experimentando con el programa hasta llegar al filtro pasa bajas mostrado en el desarrollo, se siguió el mismo procedimiento para el filtro pasa altas y el pasa banda. Al ya tener los tres filtros alambrados con su control de ganancia en diferentes protoboards, se unificaron y se probó su funcionamiento con audio estéreo de un dispositivo móvil y conectándoles la etapa de control digital (ilustración 4.20).

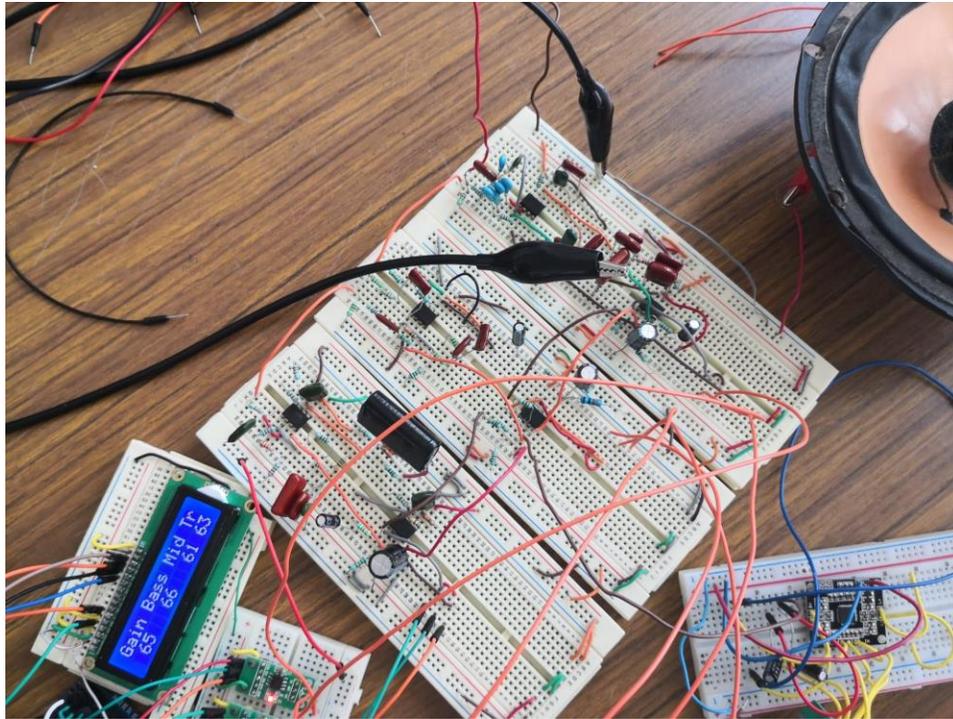


Ilustración 4.20 Prueba de funcionamiento del ecualizador de tres bandas con control de ganancia.

4.4.1 Pruebas con el osciloscopio.

Al ya tener las placas fenólicas soldadas se tenía que comprobar el correcto funcionamiento de cada filtro o placa, por lo tanto, se les realizaron pruebas introduciéndoles una señal senoidal de frecuencia variable por medio de un generador de funciones y se observó el comportamiento de la señal de salida de los filtros contra la señal de entrada del generador de funciones.

En las mediciones realizadas con el osciloscopio (frecuencia y V_{RMS}) se puede analizar, la señal de entrada (color amarillo) que proviene del generador de funciones contra la señal de salida de los filtros (color azul). La señal proveniente del generador de funciones tiene una escala de 200 mV y la señal de salida de los filtros tiene una escala de 5 V en todas las imágenes.

En la ilustración 4.21 se puede observar como la señal de entrada no se atenúa en la salida del filtro pasa bajas a los 100 Hz, en la ilustración 4.22 se observa que a 500 Hz todavía no se atenúa y en la ilustración 4.23 se observa que la señal de entrada a 1 KHz ya está completamente atenuada. Esto quiere decir que el filtro pasa bajas funciona de la manera deseada y requerida para el proyecto.

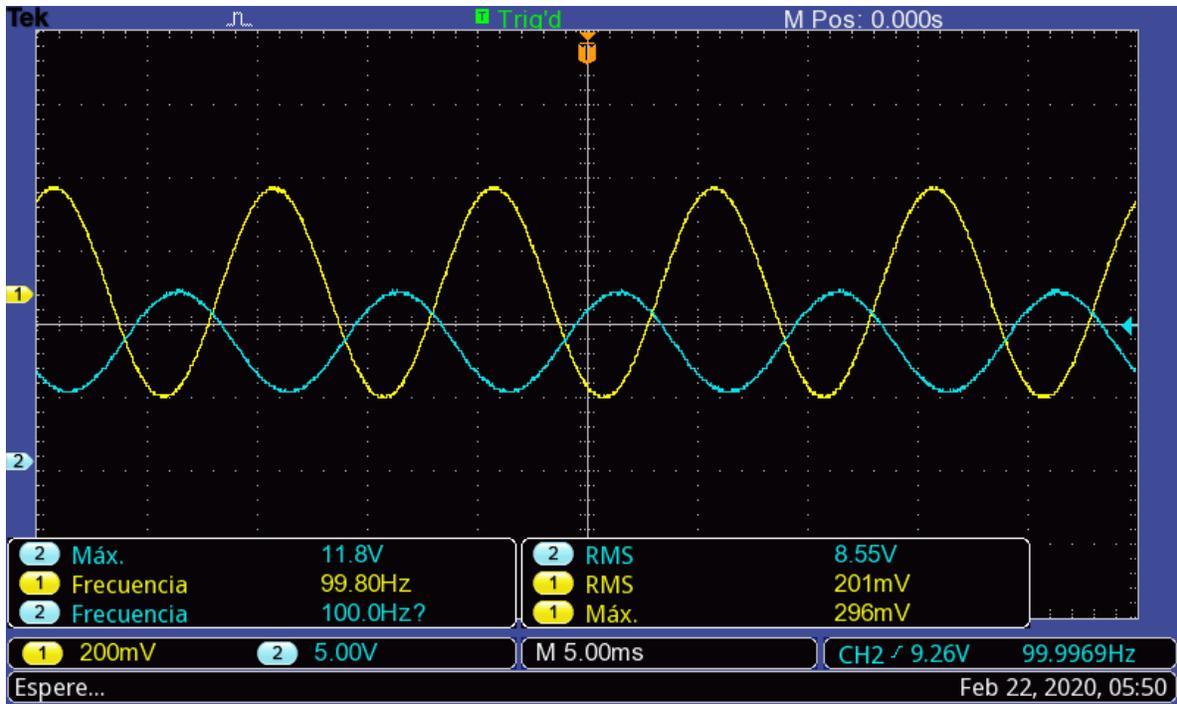


Ilustración 4.21 Prueba del filtro pasa bajas a 100 Hz.

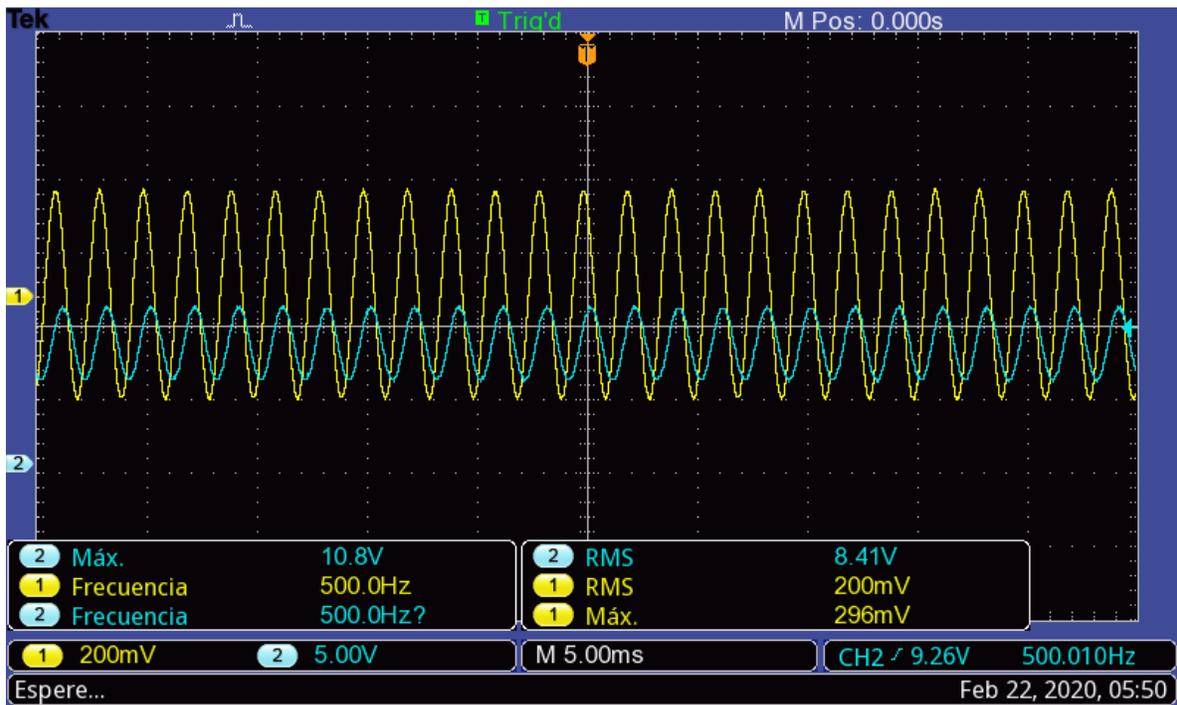


Ilustración 4.22 Prueba del filtro pasa bajas a 500 Hz.

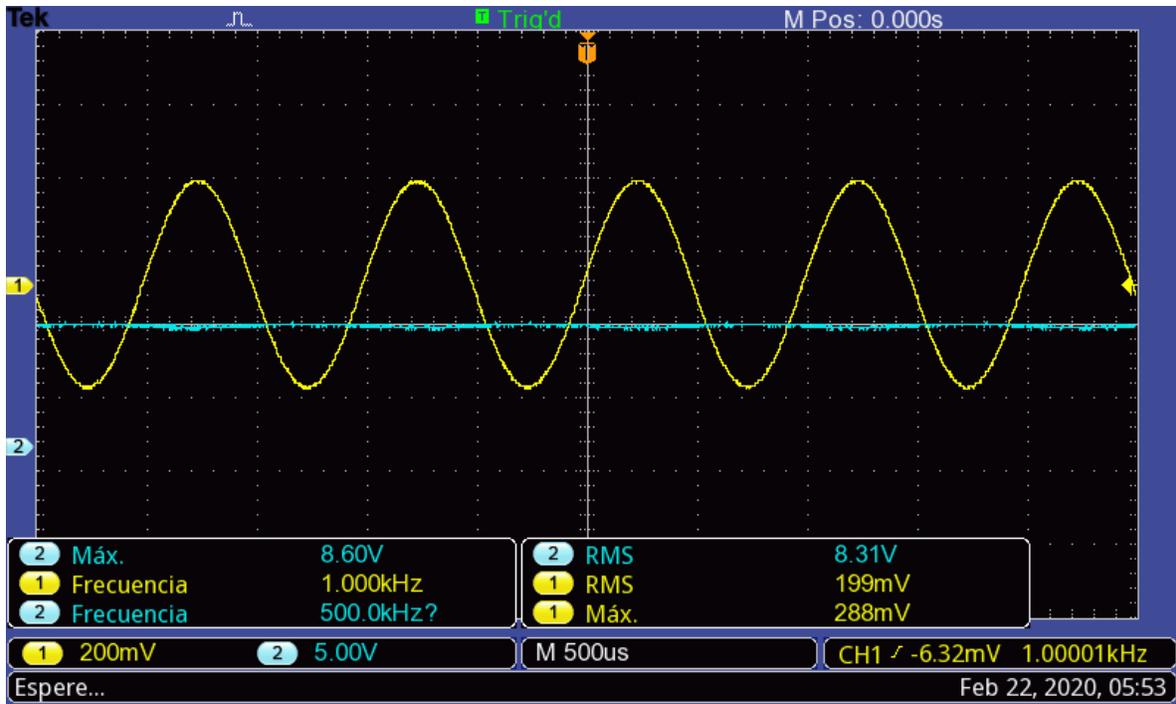


Ilustración 4.23 Prueba del filtro pasa bajas a 1 KHz.

Se realizó el mismo proceso con el filtro pasa banda, midiendo en 500 Hz (ilustración 4.24), en 1.5 KHz (ilustración 4.25) y en 2 KHz (ilustración 4.26).

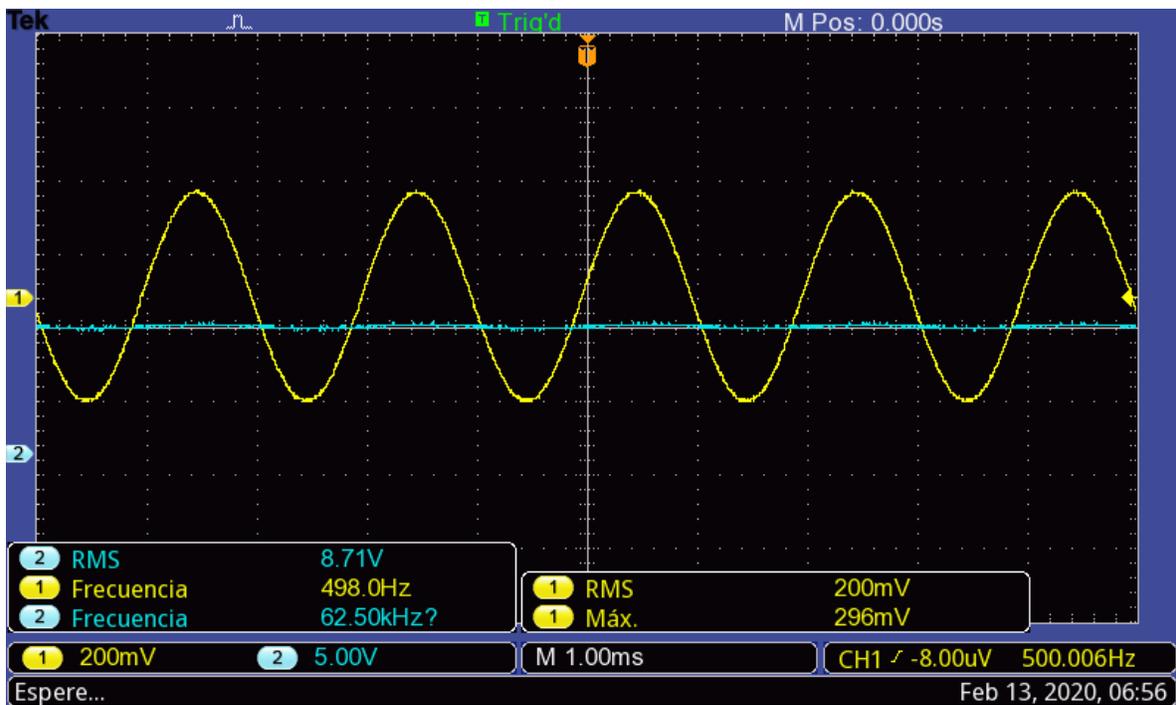


Ilustración 4.24 Prueba del filtro pasa banda a 500 Hz.

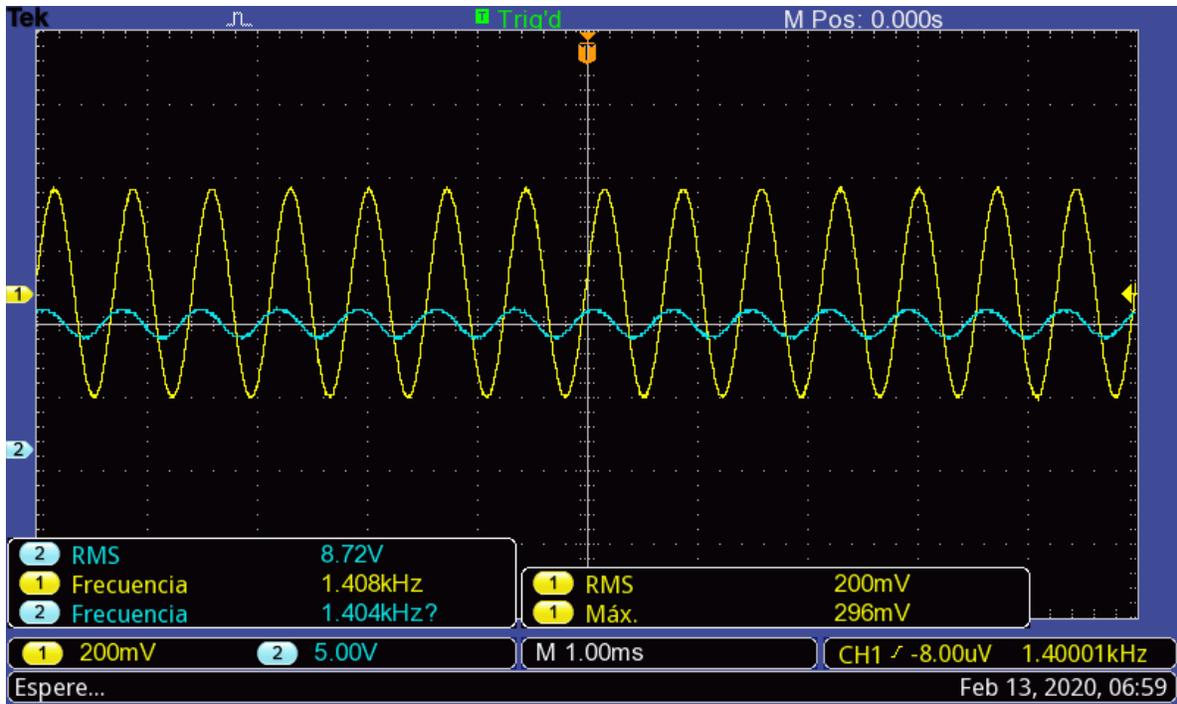


Ilustración 4.25 Prueba del filtro pasa banda a 1.4 KHz.

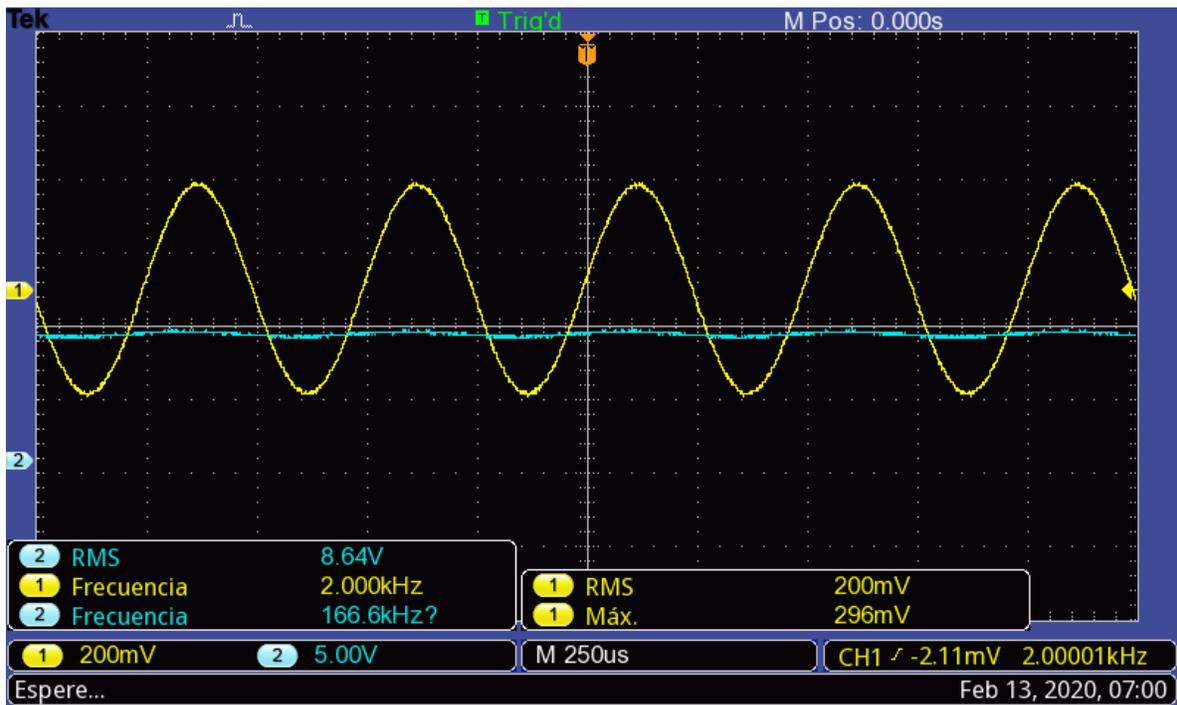


Ilustración 4.26 Prueba del filtro pasa banda a 2 KHz.

Y por último se realizaron las mediciones en el filtro pasa altas, en 1 KHz (ilustración 4.27), en 1.5 KHz (ilustración 4.28) y en 2.8 KHz (ilustración 4.29).

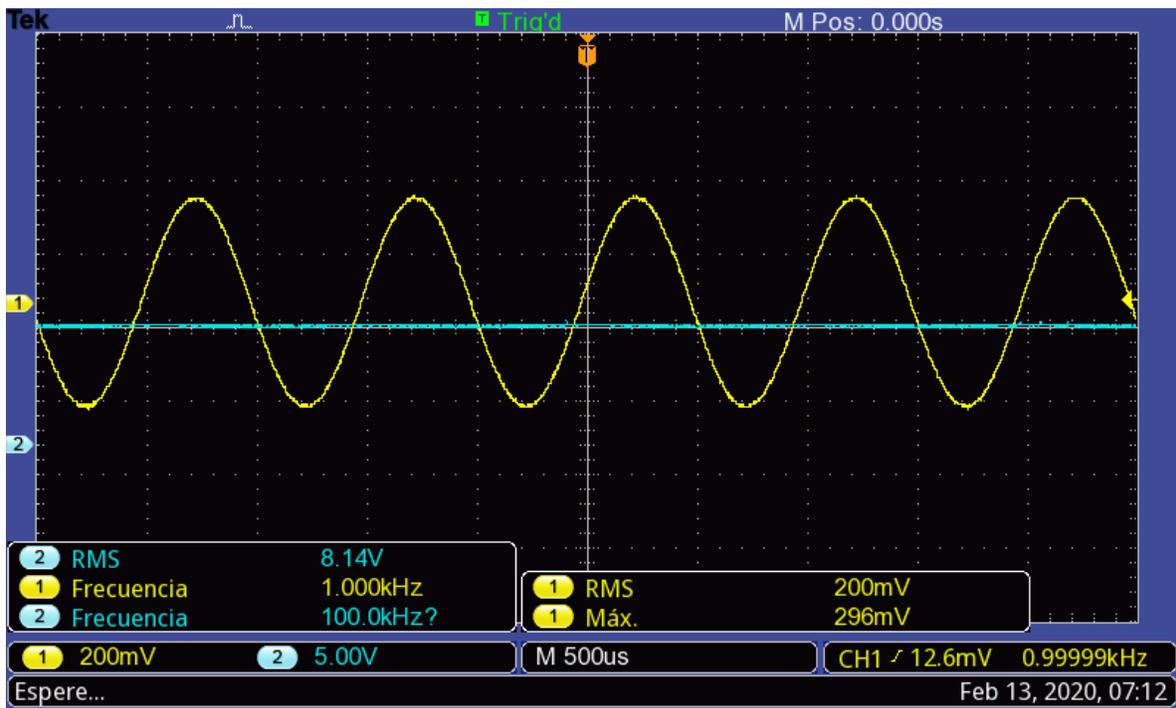


Ilustración 4.27 Prueba del filtro pasa altas 1 KHz.

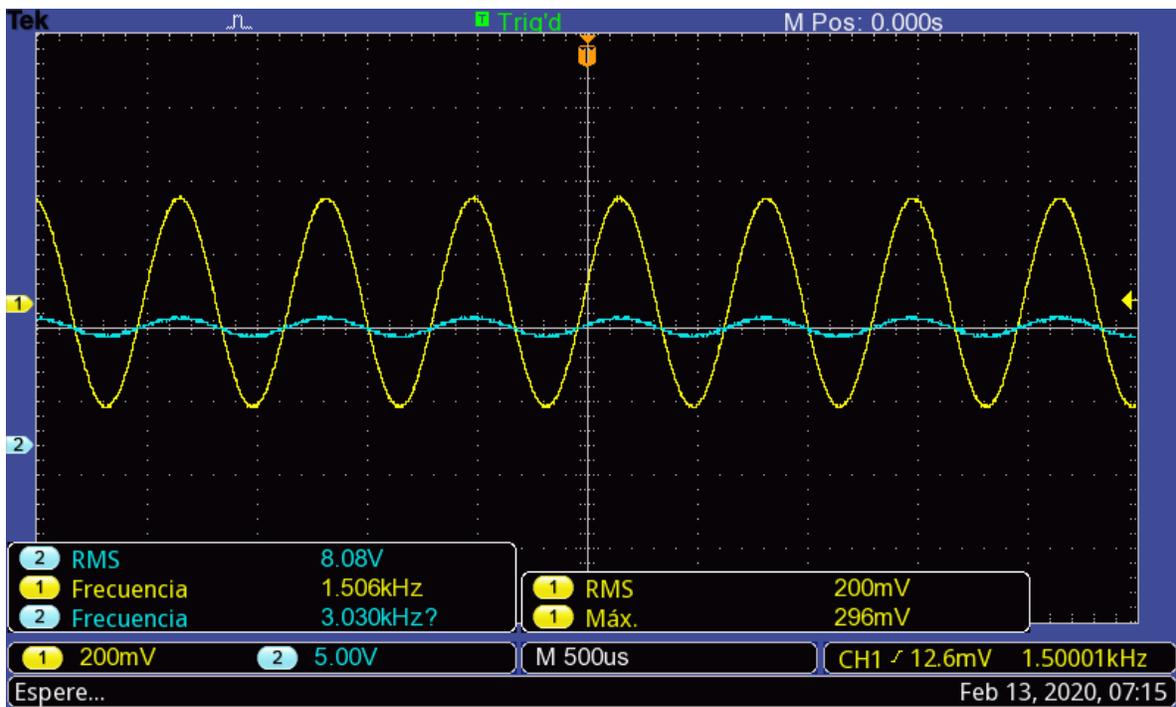


Ilustración 4.28 Pruebas del filtro pasa altas 1.5 KHz.

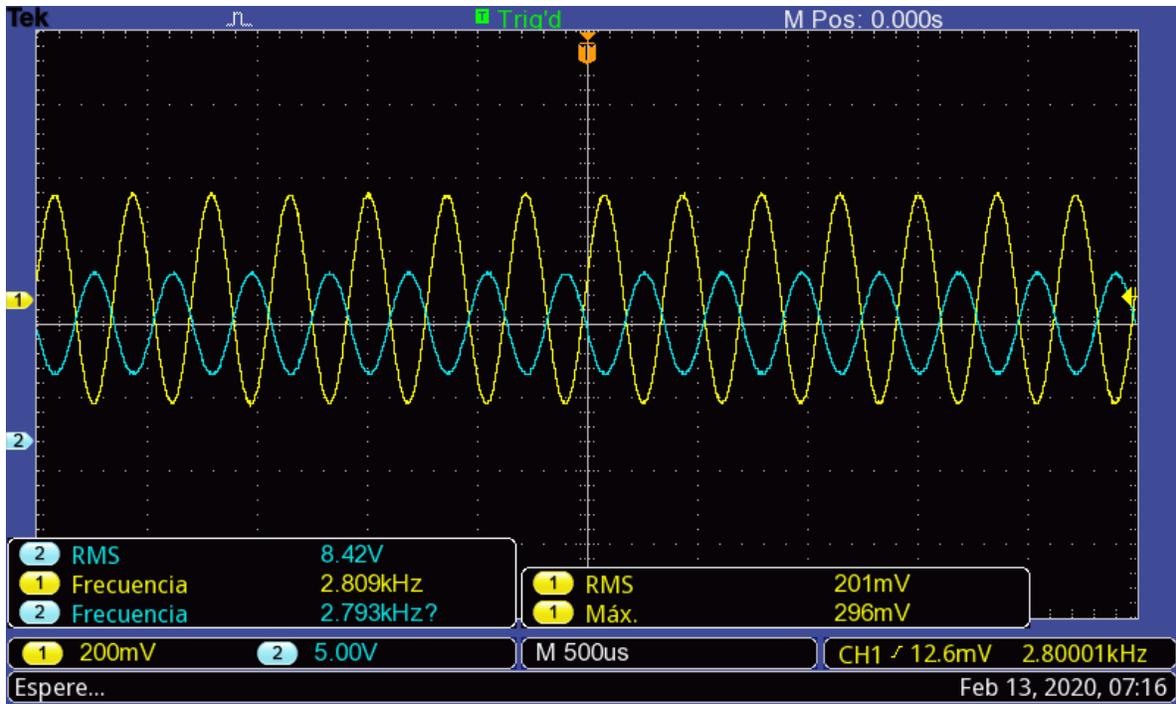


Ilustración 4.29 Pruebas del filtro pasa altas a 2.8 KHz.

Para comprobar el funcionamiento de los filtros en conjunto se interconectaron todas las placas fenólicas utilizando cables para poder obtener un solo circuito y se le conectaron potenciómetros analógicos para comprobar que el control de ganancia funcionara de forma correcta (ilustración 4.30). Consecuentemente se le introdujo una señal de audio estéreo proveniente de un dispositivo móvil y se comprobó por medio de escucha que los filtros funcionarían de manera correcta.

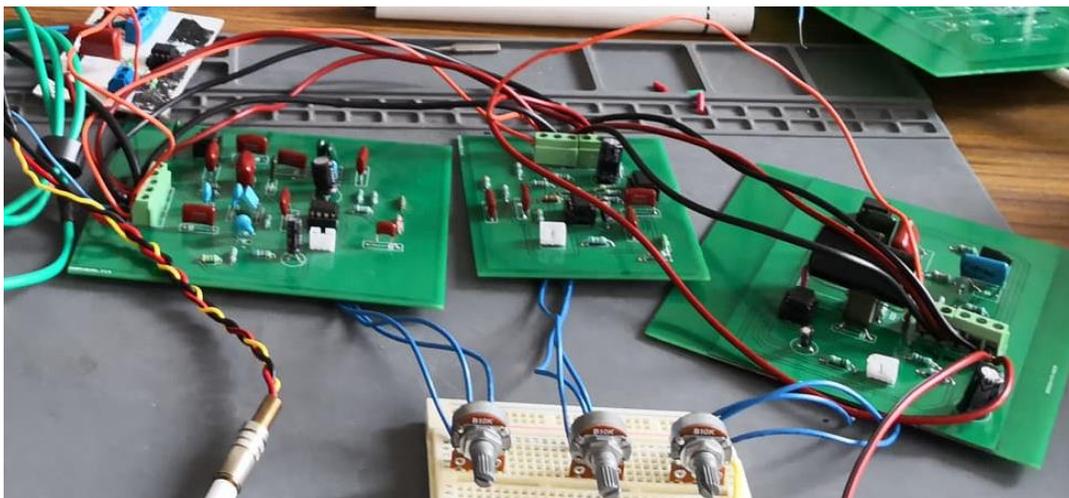


Ilustración 4.30 Filtros unificados por cables formando la etapa de ecualización de tres bandas con control de ganancia.

4.4.2 Pruebas con el analizador de espectros.

Se realizó una prueba de audio, introduciéndole ruido blanco a los filtros por medio de la salida de audífonos, para realizar un análisis espectral a través de la aplicación Advanced Spectrum Analyzer PRO, en un dispositivo Android.

Para poder observar el desempeño de los filtros se necesita utilizar un analizador de espectros, debido a que no se cuenta con un equipo para las necesidades del proyecto, se utilizó una aplicación móvil que realiza esta función

Sin embargo, no es precisa, ya que su desempeño depende de la calidad del micrófono del dispositivo y de la bocina que se utilizó para realizar las pruebas de sonido, por lo cual estas mediciones son una aproximación del funcionamiento de los filtros.

En las siguientes imágenes se puede observar todas las frecuencias y la magnitud que detecta la aplicación. Cada uno de los experimentos consistió en:

- Tomar las imágenes de los filtros cuando no tienen ganancia (ilustración 4.31),
- Cuando tienen la ganancia máxima (ilustración 4.32) y
- La ganancia máxima para cada tipo de filtro (ilustración 4.33), (ilustración 4.34), (ilustración 4.35).

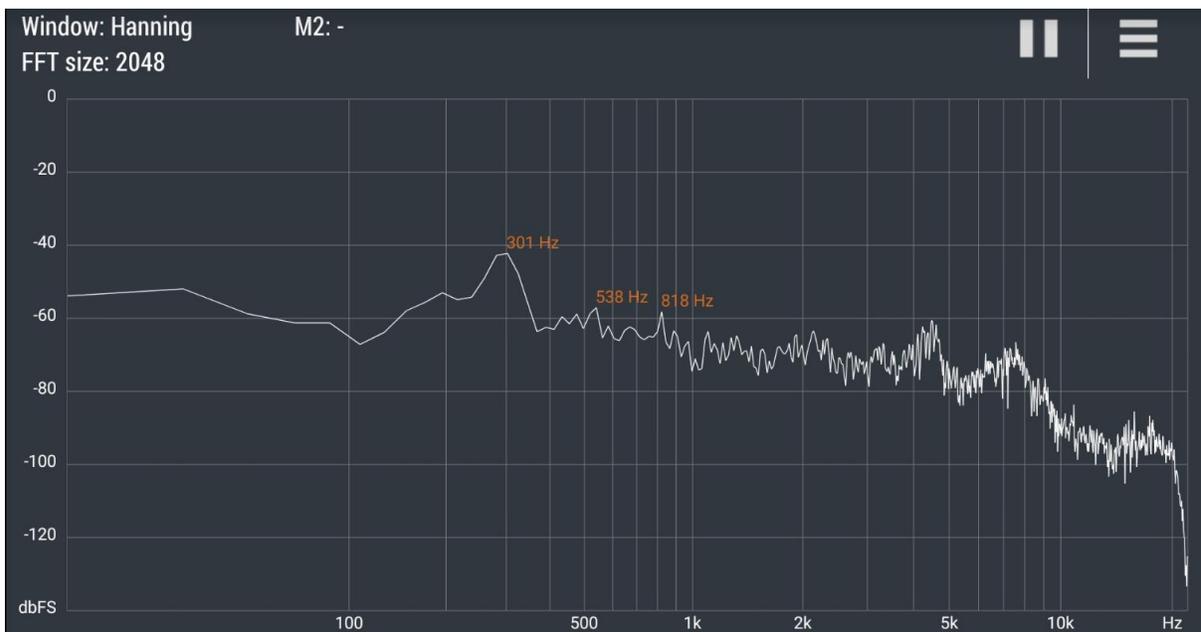


Ilustración 4.31 Comportamiento del filtro sin ganancia.

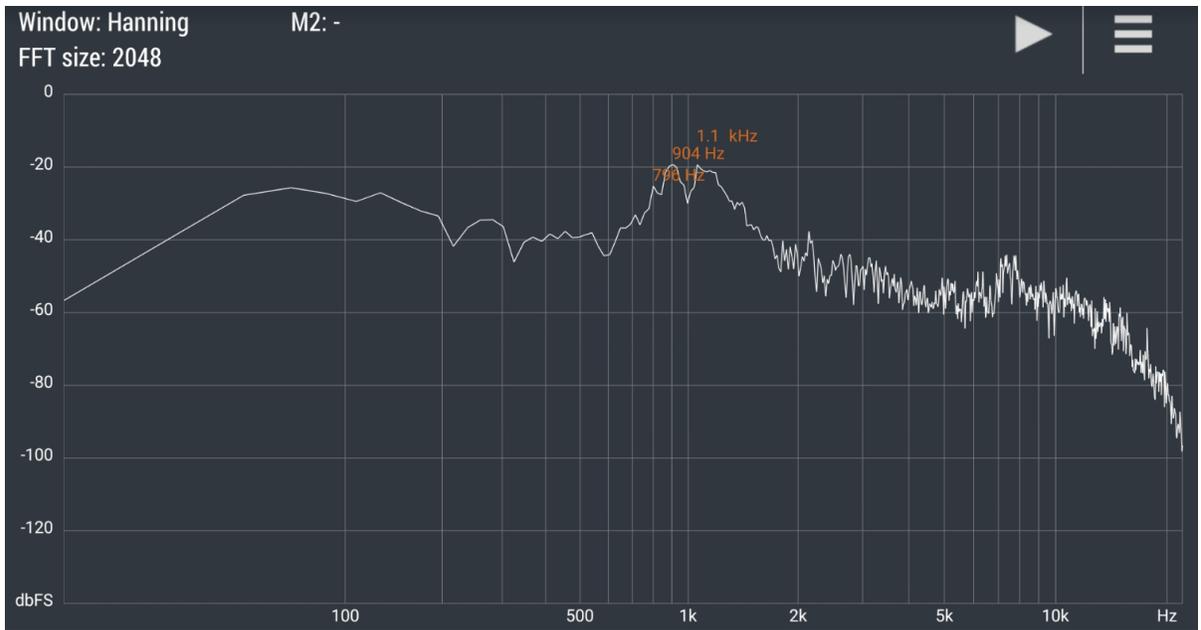


Ilustración 4.32 Comportamiento del filtro con ganancia máxima.



Ilustración 4.33 Ganancia máxima en el filtro pasa bajas.

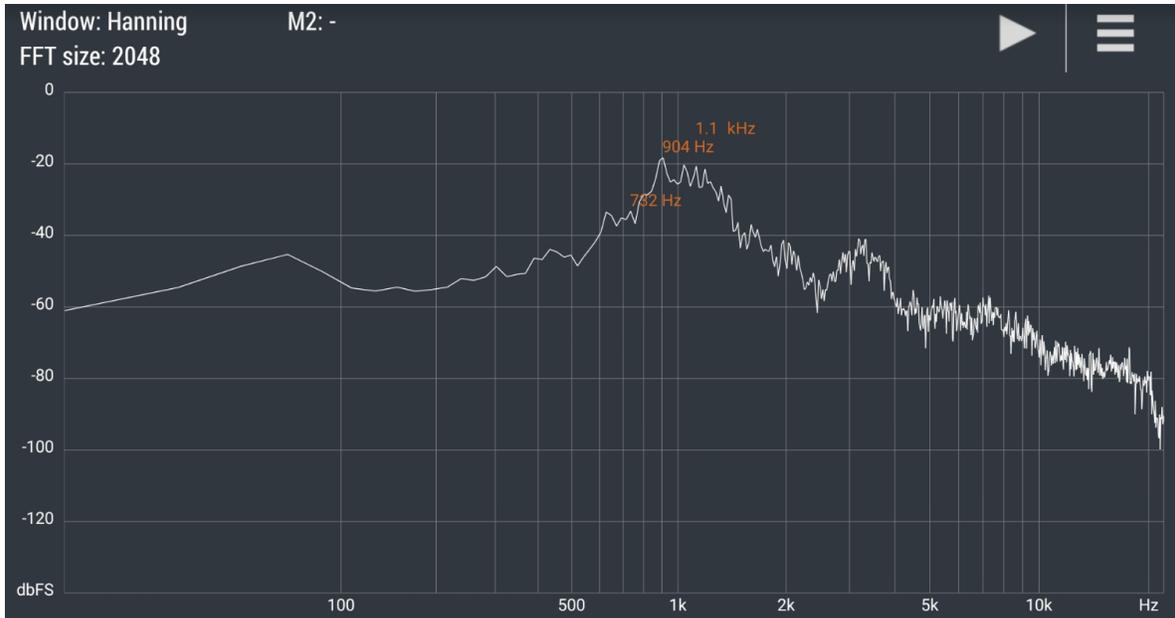


Ilustración 4.34 Ganancia máxima en el filtro pasa banda.

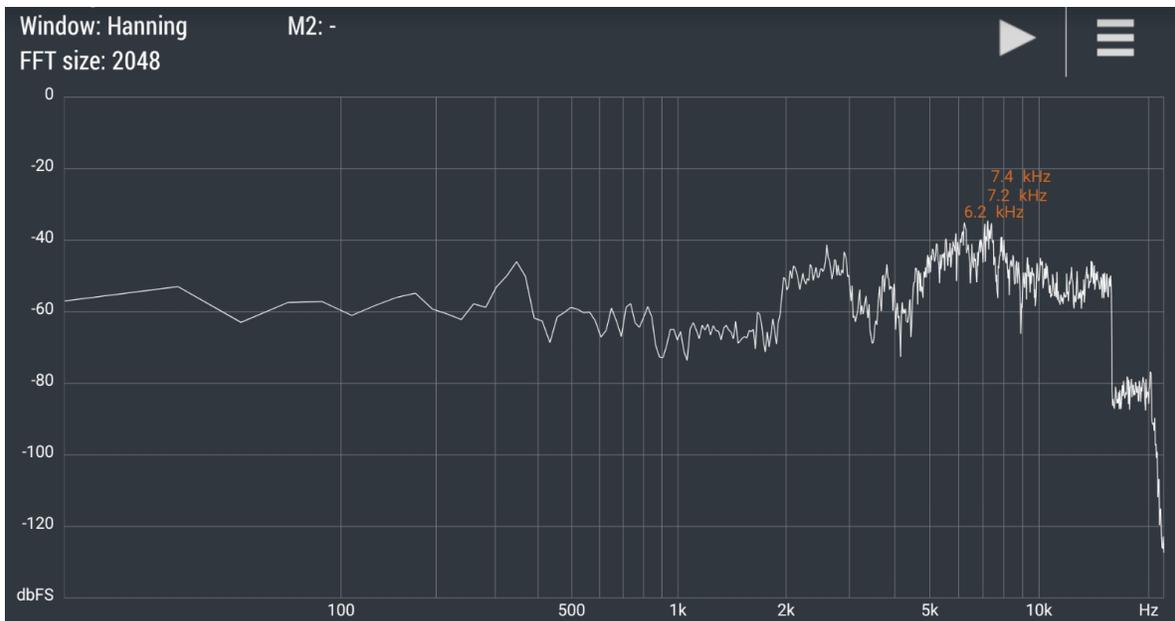


Ilustración 4.35 Ganancia máxima en el filtro pasa altas.

4.5 Pruebas con la etapa de potencia.

Al comienzo en la etapa de potencia se utilizó el mismo circuito presentado en el desarrollo, pero estaba alambrado en protoboard y sí funcionaba correctamente, pero la protoboard le causaba algunas interferencias y distorsiones al sonido, entonces se realizó la PCB de la ilustración 4.36

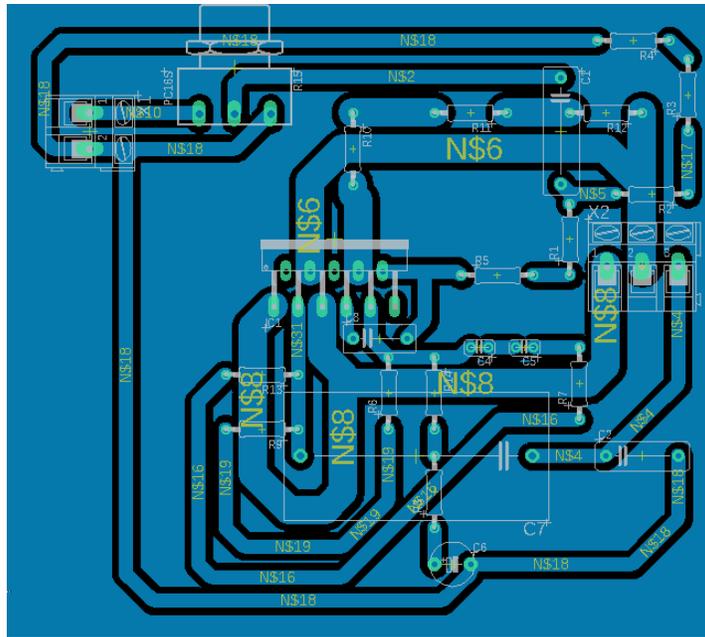


Ilustración 4.36 Primer PCB de la etapa de potencia.

Pero tenía el inconveniente de que el disipador no encajaba con el espacio que había dejado, entonces se midió correctamente el espacio que ocupaba el disipador y se realizó una PCB adecuada en la que el disipador encajara de manera correcta. Al ya tener este problema solucionado se realizó una prueba de sonido con una entrada de audio estéreo, proveniente de un teléfono celular (ilustración 4.37).

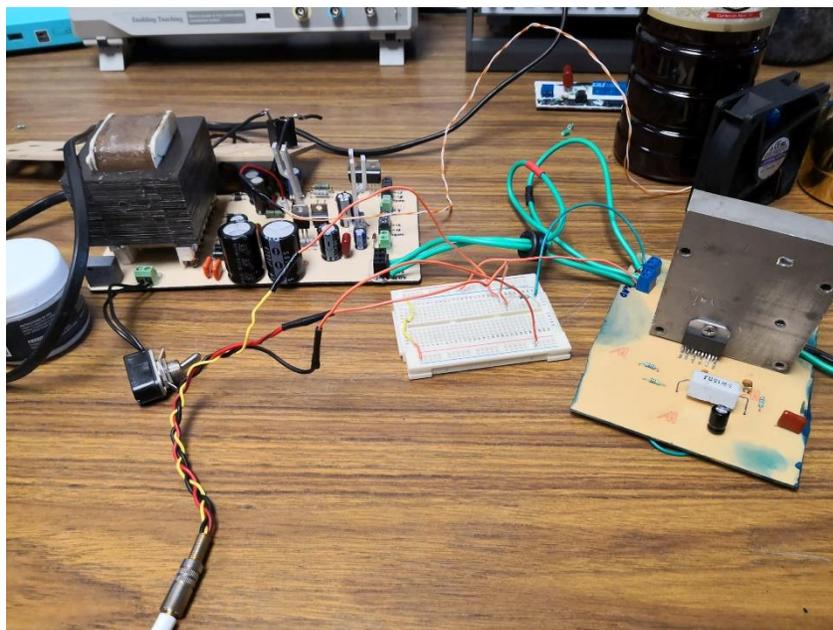


Ilustración 4.37 Prueba de sonido con teléfono móvil.

Y en la última prueba (ilustración 4.38) se comprobó que el audio de la guitarra se amplificara sin distorsionar, además de probar el desempeño de la fuente con el amplificador, los cuales fueron tuvieron un buen desempeño en su comportamiento.

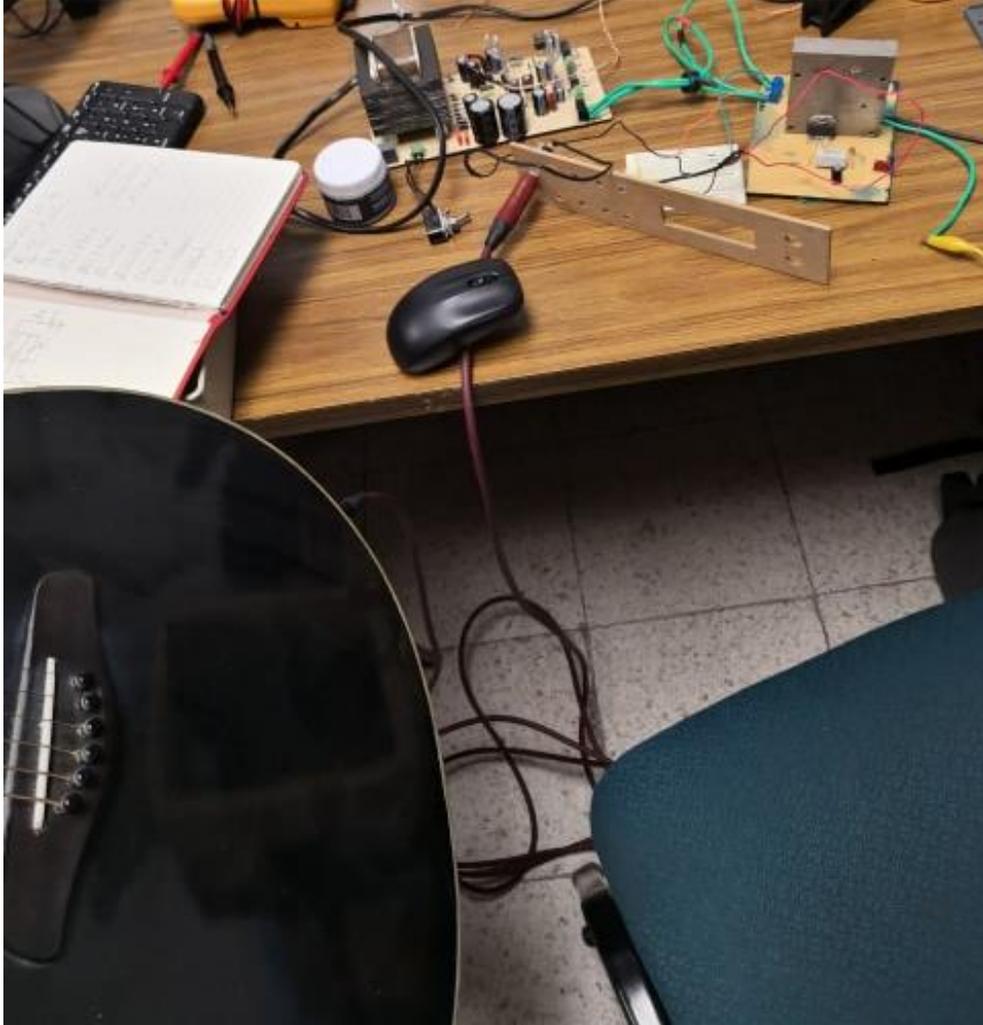


Ilustración 4.38 Pruebas con la guitarra.

4.6 Pruebas en la etapa de alimentación.

Con la fuente de alimentación se realizaron diversas pruebas para comprobar que puede trabajar adecuadamente con todas las etapas.

Y como se mostró en las ilustraciones 4.37 y 4.38 se probó el comportamiento de la fuente con la etapa de potencia y se pudo escuchar que el desempeño de las dos etapas fue correcta y satisfactoria.

Consecuentemente se le realizaron dos pruebas a la fuente de alimentación conectándole tres etapas (etapa de potencia, etapa de ecualización de tres bandas con control de ganancia y etapa preamplificadora) para comprobar el funcionamiento de los componentes analógicos sin llegar a dañar a los componentes digitales, la primera prueba fue conectándole audio en estéreo proveniente de un dispositivo móvil (ilustración 4.39) y la segunda fue conectándole una guitarra electroacústica, con estas pruebas se escucharía el desempeño del sistema y se comprobaría si tiene un buen desempeño (ilustración 4.40).

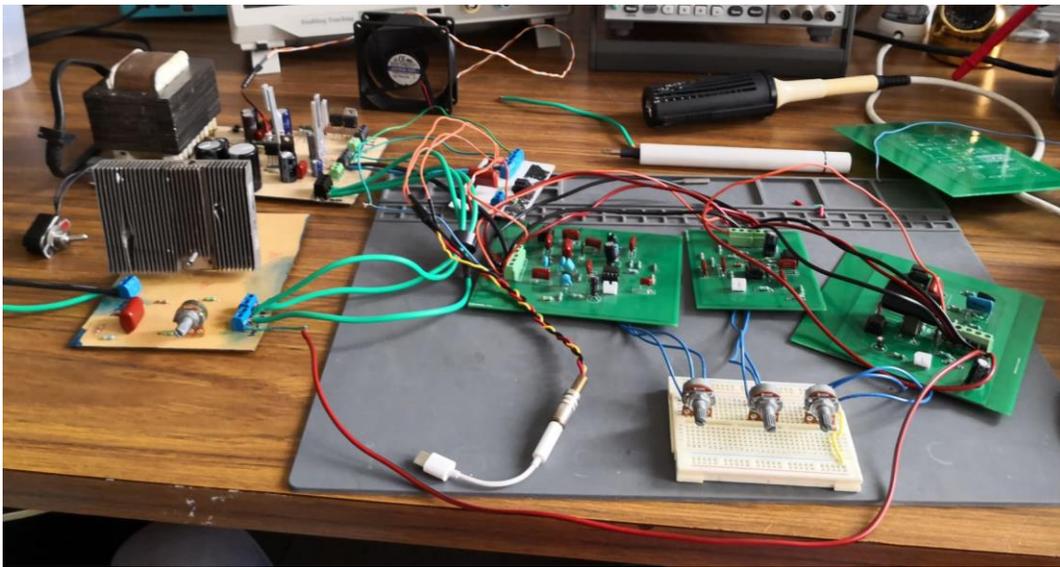


Ilustración 4.39 Prueba de funcionamiento de la fuente con los dispositivos analógicos y con audio estéreo proveniente de un dispositivo móvil.

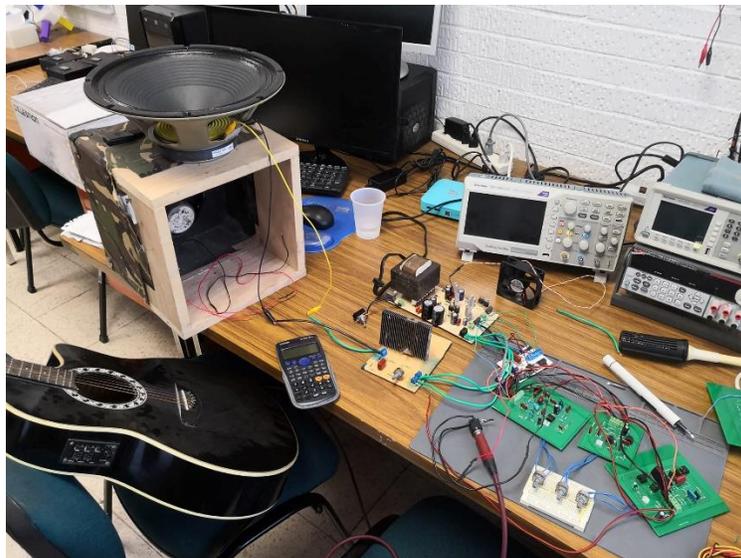


Ilustración 4.40 Prueba de funcionamiento de la fuente con los dispositivos analógicos y con audio proveniente de una guitarra electroacústica.

Y las últimas dos pruebas se realizaron conectando todas las etapas del amplificador, de igual forma se hicieron pruebas con audio estéreo proveniente de un dispositivo móvil (4.41) y con audio de una guitarra electroacústica (ilustración 4.42).

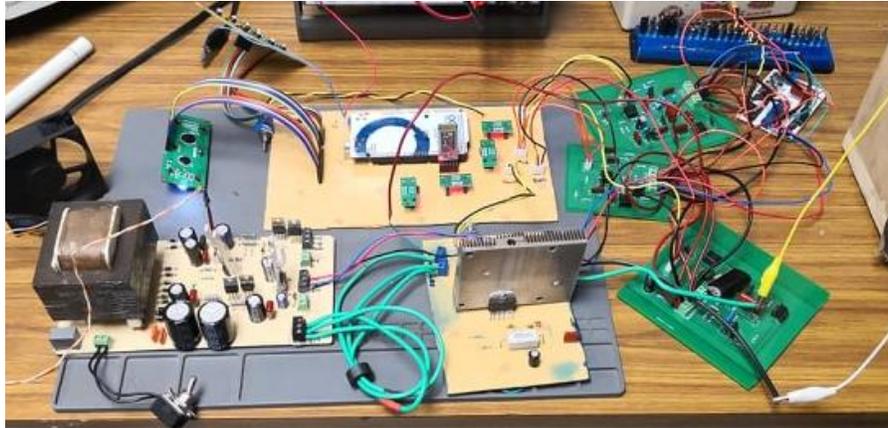


Ilustración 4.41 Pruebas con la fuente con todo el sistema conectado con audio de un dispositivo móvil.



Ilustración 4.42 Pruebas con la fuente con todo el sistema conectado con audio de un guitarra electroacústica.

4.7 Pruebas al prototipo.

Al prototipo se le realizaron pruebas de audio conectándole un reproductor de música y realizando los cambios en las ganancias de las frecuencias y volumen con un dispositivo Android (ilustración 4.43), luego se le conecto una guitarra electroacústica (ilustración 4.44) y se realizaron los mismos procedimientos antes mencionados, dando como resultado un dispositivo totalmente funcional.



Ilustración 4.43 Prueba con reproductor de música.

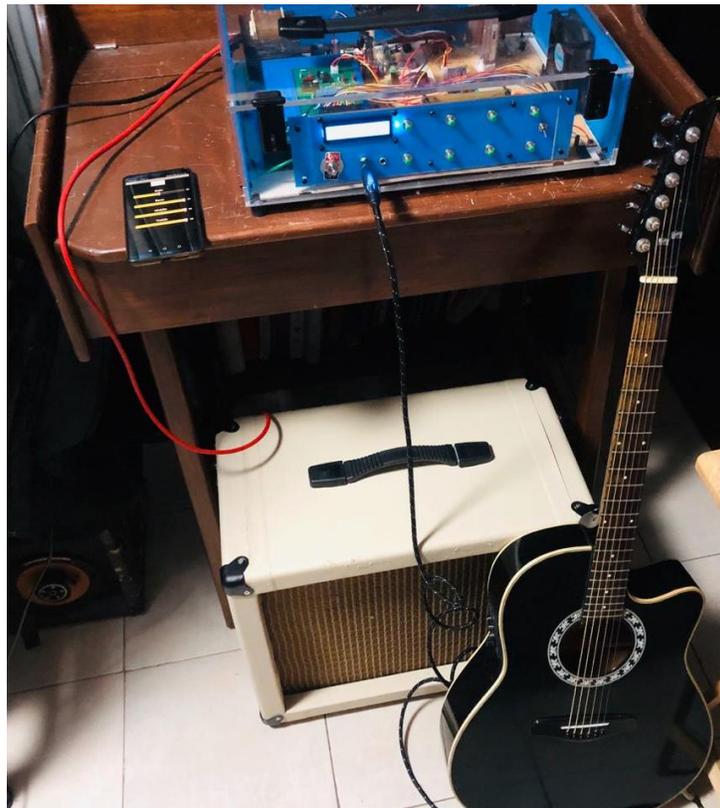


Ilustración 4.44 Pruebas con una guitarra electroacústica.

Conclusiones

Se diseñó una aplicación para dispositivos móviles con sistema operativo Android a través de la cual es posible transmitir señales de control que permiten al usuario manipular la selección de ajustes de ganancias del amplificador de manera remota.

Para enlazar la aplicación móvil con el amplificador, mediante Bluetooth, se estableció una comunicación bidireccional que habilita el intercambio constante de información, es decir, que tanto el amplificador como la aplicación están configurados para transmitir y recibir paquetes de datos.

En el amplificador se incorporó un display LCD que se encarga de informar al usuario sobre el valor en el que se encuentran los diferentes parámetros dentro del selector de ajustes de ganancias, así mismo se integró un conjunto de botones que hacen posible el control convencional del amplificador cuando la manipulación inalámbrica no sea requerida. Los valores mostrados en el LCD y la aplicación se encuentran sincronizados mediante la comunicación bidireccional mencionada anteriormente. De esta manera si se realiza un cambio ya sea desde los botones o desde la aplicación, la variación de los valores se refleja de igual forma tanto en el LCD como en la interfaz de la aplicación.

Debido a que el proyecto está constituido por electrónica digital y electrónica analógica, se necesitó un acoplamiento para unificar ambas partes. Los componentes utilizados para dicha finalidad son los potenciómetros digitales ya que permiten variar un valor resistivo desde un entorno digital lo cual era necesario para el sistema propuesto.

Para separar las frecuencias emitidas por una guitarra eléctrica en tres diferentes bandas (agudos, graves y agudos), se diseñaron filtros activos utilizando un software llamado “Filter Design Tool”, y cada filtro fue estructurado empleando amplificadores operacionales especiales para audio.

La señal de salida de los filtros es conectada a otro amplificador operacional especial para audio, en configuración inversora para poder controlar la amplitud de cada una de las bandas de frecuencias. En este tipo de configuración, la ganancia es establecida por la división de una resistencia entre otra, lo que quiere decir que, si alguna de estas resistencias es variable,

la ganancia también lo será. Este circuito junto con el acoplamiento efectuado por los potenciómetros digitales hizo posible manipular la ganancia desde un entorno digital.

Como transductor de salida, se utilizó una bocina Celestion de 8 Ω y 70 W, misma que requirió de un circuito de potencia para poder ser excitada. Dicho circuito se calculó respetando las características eléctricas del transductor. Para ello se empleó un circuito integrado LM3886, que en conjunto con otros componentes dotan a la señal de la amplitud necesaria para poder activar la bocina.

Dado que cada etapa del proyecto funciona con diferentes valores de tensión, se implementó una fuente de alimentación para proveer a cada etapa de los valores de voltaje, corriente y potencia que estas demandan. De esta manera se consiguió que el sistema propuesto trabaje de manera unificada.

Para la gestión de las funciones del amplificador, se utilizó un microcontrolador encargado de procesar información y ejecutar instrucciones dependiendo de las señales de entrada recibidas. Se estructuró un código basado en diagramas de flujo diseñados previamente para la correcta y ordenada ejecución de las instrucciones demandadas por el sistema propuesto.

Mencionado lo anterior, la realización del prototipo presentado cumple con los objetivos planteados, ya que como producto final se obtuvo un amplificador para guitarra eléctrica, el cual es manipulado a través de dispositivos móviles con sistema operativo Android. El dispositivo permite controlar de manera inalámbrica y convencional la ecualización del sonido de la guitarra en tres diferentes bandas de frecuencias que son: agudos, graves y medios. Logrando así un correcto acoplamiento entre etapas de electrónica analógica y etapas de electrónica digital.

Trabajo futuro

Este prototipo puede ser el punto de inicio para el desarrollo de dispositivos más sofisticados. Existen diferentes mejoras que podrían ser implementadas, una de ellas consistiría en permitirle al usuario grabar configuraciones personalizadas desde la aplicación y que, con solo presionar un botón, los diferentes valores de ecualización sean situados como el usuario los configuró. Adicionalmente en lugar Bluetooth, utilizar algún otro protocolo de comunicación para aumentar el alcance de las señales de control emitidas desde el dispositivo remoto. Podrían ser agregadas más bandas selectoras de frecuencia, también sería conveniente optimizar el código realizado en esta propuesta reduciendo las líneas de este, aplicando mejores prácticas de programación e incluso realizar la aplicación móvil utilizando otro entorno de desarrollo diferente al de App Inventor, entre otras mejoras más.

El presente desarrollo pudo incorporar diferentes ramas de la electrónica aprendidas durante el transcurso de la universidad para ser aplicadas en el mundo del audio y de las guitarras eléctricas.

Referencias de imágenes.

Ilustración 2.1 Guitarra de fines del siglo XVI. Recuperada el 22 de noviembre de 2019 de: F. Pedrell, «Guitarra,» de Diccionario técnico de la música, Barcelona, Maxtor, 2009, p. 212.

Ilustración 2.2 Guitarra Fender Broadcaster. Recuperada el 24 de noviembre de 2019 de: https://www.lpi.tel.uva.es/~nacho/docencia/ing_ond_1/trabajos_02_03/Guitarra/Web/historia.htm

Ilustración 2.3 Partes de una guitarra. Recuperada el 24 de noviembre de 2019 de: https://www.lpi.tel.uva.es/~nacho/docencia/ing_ond_1/trabajos_02_03/Guitarra/Web/partesguitarra.htm

Ilustración 2.4 Pastilla single coil. Recuperada el 27 de noviembre de 2019 de <https://www.pastillasguitarra.es/tipos-pastillas-guitarra/>

Ilustración 2.5 Pastilla humbucker. Recuperada el 27 de noviembre de 2019 de: <https://www.pastillasguitarra.es/tipos-pastillas-guitarra/>

Ilustración 2.6 Frecuencias de la guitarra. Recuperada el 27 de noviembre de 2019 de: M. Romero Dopico, AMPLIFICADOR A VÁLVULAS PARA GUITARRA ELÉCTRICA, Madrid, UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID, 2011, pp. 19-20.

Ilustración 2.7 Terminales de un amplificador operacional. Recuperada el 28 de noviembre de 2019 de: <http://www.electronicasi.com/enseanzas/electronica-avanzada/electronica-universitaria/electronica-analogica/introduccion-a-los-amplificaciones-operacionales/>

Ilustración 2.8 Diagrama electrónico de un seguidor de voltaje. Recuperada el 27 de noviembre de 2019 de: <http://www.academicos.ccadet.unam.mx/jorge.marquez/cursos/Instrumentacion/AmplificadoresOperacionales.pdf>

Ilustración 2.9 Diagrama electrónico de un amplificador inversor. Recuperada el 27 de noviembre de 2019 de: <http://www.academicos.ccadet.unam.mx/jorge.marquez/cursos/Instrumentacion/AmplificadoresOperacionales.pdf>

Ilustración 2.10 Diagrama electrónico de un amplificador no inversor. Recuperado el 27 de noviembre de 2019 de:

<http://www.academicos.ccadet.unam.mx/jorge.marquez/cursos/Instrumentacion/AmplificadoresOperacionales.pdf>

Ilustración 2.11 Gráfica de respuesta de un filtro pasa bajas. Recuperado el 29 de noviembre de 2019 de: E. M. Balboa Morales y M. A. Sáez Saldías, Análisis, diseño y construcción de filtros activos, Concepción: Universidad de Bío-Bío, 2016, pp. 8-22.

Ilustración 2.12 Gráfica de respuesta de un filtro pasa banda. Recuperado el 29 de noviembre de 2019 de: E. M. Balboa Morales y M. A. Sáez Saldías, Análisis, diseño y construcción de filtros activos, Concepción: Universidad de Bío-Bío, 2016, pp. 8-22.

Ilustración 2.13 Gráfica de respuesta de un filtro pasa altas. Recuperado el 29 de noviembre de 2019 de: E. M. Balboa Morales y M. A. Sáez Saldías, Análisis, diseño y construcción de filtros activos, Concepción: Universidad de Bío-Bío, 2016, pp. 8-22.

Ilustración 2.14 Gráfica de respuesta de un filtro rechaza banda. Recuperado el 29 de noviembre de 2019 de: E. M. Balboa Morales y M. A. Sáez Saldías, Análisis, diseño y construcción de filtros activos, Concepción: Universidad de Bío-Bío, 2016, pp. 8-22.

Ilustración 2.15 Representación gráfica del filtro pasa todo ideal. Recuperado el 29 de noviembre de 2019 de: G. Quiroz Córdova, Laboratorio Analógico, Puebla: Universidad de las Américas Puebla, 2007, p. 13.

Ilustración 2.16 Respuesta de filtro pasa bajas. Recuperada el 6 de diciembre del 2019 de: <https://webench.ti.com/filter-design-tool/filter-type>

Ilustración 2.17 Respuesta de filtro pasa altas. Recuperada el 6 de diciembre del 2019 de: <https://webench.ti.com/filter-design-tool/filter-type>

Ilustración 2.18 Respuesta de filtro pasa banda. Recuperada el 6 de diciembre del 2019 de: <https://webench.ti.com/filter-design-tool/filter-type>

Ilustración 2.19 Respuesta de filtro rechaza banda. Recuperada el 6 de diciembre del 2019 de: <https://webench.ti.com/filter-design-tool/filter-type>

Ilustración 2.20 Respuesta de filtro pasa todo. Recuperada el 6 de diciembre del 2019 de:
<https://webench.ti.com/filter-design-tool/filter-type>

Ilustración 2.21 Módulo: respuesta del filtro. Recuperada el 6 de diciembre del 2019 de:
<https://webench.ti.com/filter-design-tool/filter-response>

Ilustración 2.22 Especificaciones. Recuperada el 6 de diciembre del 2019 de:
<https://webench.ti.com/filter-design-tool/filter-response>

Ilustración 2.23 Características de la frecuencia de paro. Recuperada el 6 de diciembre del 2019 de: <https://webench.ti.com/filter-design-tool/filter-response>

Ilustración 2.24 Gráfica de respuesta. Recuperada el 6 de diciembre del 2019 de:
<https://webench.ti.com/filter-design-tool/filter-response>

Ilustración 2.25 Respuesta para el filtro. Recuperada el 6 de diciembre del 2019 de:
<https://webench.ti.com/filter-design-tool/filter-response>

Ilustración 2.26 Topología de los filtros. Recuperada el 6 de diciembre del 2019 de:
<https://webench.ti.com/filter-design-tool/topology>

Ilustración 2.27 Características de la topología. Recuperada el 6 de diciembre del 2019 de:
<https://webench.ti.com/filter-design-tool/topology>

Ilustración 2.28 Circuito generado del filtro. Recuperada el 6 de diciembre del 2019 de:
<https://webench.ti.com/filter-design-tool/design/42>

Ilustración 2.29 Tolerancias de resistencias y capacitores. Recuperada el 6 de diciembre de 2019 de: <https://webench.ti.com/filter-design-tool/design/42>

Ilustración 2.30 Encapsulado del LM3886. Recuperada el 14 de marzo de 2020 de:
<https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/517665/TI1/LM3886.html>

Ilustración 2.31 Resistencias que definen la ganancia. Recuperada el 15 de febrero de 2020 de: <http://www.circuitbasics.com/design-hi-fi-audio-amplifier-lm3886/>

Ilustración 2.32 Resistencias para equilibrar la corriente. Recuperada el 15 de febrero de 2020 de: <http://www.circuitbasics.com/design-hi-fi-audio-amplifier-lm3886/>

Ilustración 2.33 Capacitor de acople. Recuperada el 15 de febrero de 2020 de: <http://www.circuitbasics.com/design-hi-fi-audio-amplifier-lm3886/>

Ilustración 2.34 Capacitor pasa bajas del bucle de retroalimentación. Recuperada el 15 de febrero de 2020 de: <http://www.circuitbasics.com/design-hi-fi-audio-amplifier-lm3886/>

Ilustración 2.35 Capacitor pasa bajas de la entrada no inversora. Recuperada el 15 de febrero de 2020 de: <http://www.circuitbasics.com/design-hi-fi-audio-amplifier-lm3886/>

Ilustración 2.36 Capacitor de C_f y resistencia R_{f2} . Recuperada el 15 de febrero de 2020 de: <http://www.circuitbasics.com/design-hi-fi-audio-amplifier-lm3886/>

Ilustración 2.37 Red de Zobel. Recuperada el 15 de febrero del 2020 de: <http://www.circuitbasics.com/design-hi-fi-audio-amplifier-lm3886/>

Ilustración 2.38 Diagrama de bloques de un sistema continuo y un sistema discreto. Recuperado el 1 de diciembre de 2019 de: L. Flórez C., «Sistemas,» de Señales y sistemas. Una aproximación al laboratorio, Bogotá, p. 29.

Ilustración 2.39 Diagrama de bloques de un sistema de control de lazo abierto. Recuperado el 23 de noviembre de 2019 de: C. Angulo Bahón y C. Raya Ginar, «Principios básicos de la teoría de control,» de Tecnologías de sistemas de control, Barcelona, 2004, pp. 31-35.

Ilustración 2.40 Diagrama de bloques de un sistema de control cerrado. Recuperado el 23 de noviembre de 2019 de: C. Angulo Bahón y C. Raya Ginar, «Principios básicos de la teoría de control,» de Tecnologías de sistemas de control, Barcelona, 2004, pp. 31-35.

Ilustración 2.41 Diagrama de bloques de un sistema de control digital. Recuperado el 23 de noviembre de 2019 de: C. Angulo Bahón y C. Raya Ginar, «Principios básicos de la teoría de control,» de Tecnologías de sistemas de control, Barcelona, 2004, pp. 31-35.

Ilustración 2.42 Esquema de un microcontrolador. Recuperado el 24 de noviembre de 2019 de: A. S. Vázquez Fernández-Pacheco, F. Ramos de la Flor, R. Fernández Rodríguez, I. Payo Gutiérrez y A. Adán Oliver, «Definición de microcontrolador,» de Robótica educativa, Madrid, RA-MA, pp. 115-116.

Ilustración 2.43 Logotipo de Arduino. Recuperado el 25 de noviembre del 2019 de: E. López Aldea, «Arduino,» de Arduino. Guía práctica de fundamentos y simulación , Madrid, RA-MA, 2016, pp. 51,69.

Ilustración 2.44 Microcontroladores Atmel de la familia AVR. Recuperado el 25 de noviembre del 2019 de: https://mafiadoc.com/3-overview-microcontroladores-atmel_59c7362d1723ddf98031170a.html

Ilustración 2.45 Arduino Mega 2560. Recuperado el 25 de noviembre de 2019 de: <https://store.arduino.cc/usa/mega-2560-r3>

Ilustración 2.46 Interfaz principal de Arduino IDE. Recuperado el 25 de noviembre de 2019 de: Ó. Torrente Artero, «Software Arduino,» de ARDUINO. Curso práctico de formación, Madrid, RC Libros, 2013, p. 129.

Ilustración 2.47 Resistencias fijas. Recuperado el 27 de noviembre de 2019 de: J. M. Miguelañez García, «Resistencias,» de Electricidad básica para TMA-s, Madrid, 2018, pp. 58-69.

Ilustración 2.48 Resistencias ajustables y variables. Recuperado el 27 de noviembre de 2019 de: J. M. Miguelañez García, «Resistencias,» de Electricidad básica para TMA-s, Madrid, 2018, pp. 58-69.

Ilustración 2.49 Interior de un potenciómetro. Recuperado el 27 de noviembre de 2019 de: J. M. Miguelañez García, «Resistencias,» de Electricidad básica para TMA-s, Madrid, 2018, pp. 58-69.

Ilustración 2.50 Configuración de pines del potenciómetro digital. Recuperado el 28 de noviembre de 2019 de: <https://www.renesas.com/us/en/www/doc/datasheet/x9c102-103-104-503.pdf>.

Ilustración 2.51 Diagrama de bloques del potenciómetro digital. Recuperado el 28 de noviembre de 2019 de: <https://www.renesas.com/us/en/www/doc/datasheet/x9c102-103-104-503.pdf>.

Ilustración 2.52 Funciones del potenciómetro digital. Recuperado el 28 de noviembre de 2019 de: <https://www.renesas.com/us/en/www/doc/datasheet/x9c102-103-104-503.pdf>.

Ilustración 2.53 Pantalla LCD de 16x2. Recuperado el 30 de noviembre de 2019 de: <https://electronicastore.net/producto/lcd-16x2-hd4478-display-con-luz-de-fondo-azul/>

Ilustración 2.54 Modulo Bluetooth HC-05. Recuperado el 30 de noviembre de 2019 de: <https://www.cdmxelectronica.com/producto/bluetooth-hc-05-maestro-esclavo-6-pines/>

Ilustración 2.55 Sección de diseño de App Inventor 2. Imagen propia.

Ilustración 2.56 Editor de bloques de App Inventor 2. Imagen propia.

Ilustración 2.57 Diagrama de una bocina. Recuperado el 3 de diciembre de 2019 de: A. Mesa Méndez, de Tópicos selectos de Audio, Santa Clara, UNIVERSIDAD CENTRAL MARTA ABREU DE LAS VILLAS, 2017, pp. 36-42 .

Ilustración 2.58 Relación entre impedancia y resistencia de una bocina. Recuperado el 3 de diciembre de 2019 de: A. Mesa Méndez, de Tópicos selectos de Audio, Santa Clara, UNIVERSIDAD CENTRAL MARTA ABREU DE LAS VILLAS, 2017, pp. 36-42 .

Ilustración 2.59 Índice de directividad de una bocina. Recuperado el 3 de diciembre de 2019 de: A. Mesa Méndez, de Tópicos selectos de Audio, Santa Clara, UNIVERSIDAD CENTRAL MARTA ABREU DE LAS VILLAS, 2017, pp. 36-42 .

Ilustración 2.60 Diagrama a bloques de una fuente de alimentación. Recuperado el 10 de febrero de 2020 de: <https://www.ceduc.cl/aula/cqbo/materiales/EI/EI-170/Diseno%20de%20Fuentes%20de%20Alimentacion.pdf>

Ilustración 2.61 Rectificador de diodos. Recuperado el 10 de febrero de 2020 de: <https://www.ceduc.cl/aula/cqbo/materiales/EI/EI-170/Diseno%20de%20Fuentes%20de%20Alimentacion.pdf>

Ilustración 2.62 Filtro de capacitor a la entrada. Recuperado el 10 de febrero de 2020 de: <https://www.ceduc.cl/aula/cqbo/materiales/EI/EI-170/Diseno%20de%20Fuentes%20de%20Alimentacion.pdf>

Ilustración 2.63 Regulador lineal. Recuperado el 10 de febrero de 2020 de: <https://www.ceduc.cl/aula/cqbo/materiales/EI/EI-170/Diseno%20de%20Fuentes%20de%20Alimentacion.pdf>

Ilustración 3.1 Diagrama a bloques del sistema. Imagen propia.

Ilustración 3.2 Respuesta del filtro de 5° orden. Imagen propia.

Ilustración 3.3 Características de la frecuencia de paro para el filtro pasa bajas. Imagen propia.

Ilustración 3.4 Diagrama del circuito. Imagen propia.

Ilustración 3.5 Respuesta del filtro de 6° orden. Imagen propia.

Ilustración 3.6 Características de la frecuencia de paro para el filtro pasa altas. Imagen propia.

Ilustración 3.7 Diagrama del circuito. Imagen propia.

Ilustración 3.8 Respuesta del filtro de 4° orden. Imagen propia.

Ilustración 3.9 Frecuencia de corte inicial. Imagen propia.

Ilustración 3.10 Frecuencia de corte final. Imagen propia.

Ilustración 3.11 Especificaciones de la frecuencia de paro para el filtro pasa banda. Imagen propia.

Ilustración 3.12 Diagrama del circuito. Imagen propia.

Ilustración 3.13 Diagrama del control de ganancia. Imagen propia

Ilustración 3.14 Sumador. Imagen propia.

Ilustración 3.15 Esquemático del ecualizador de tres bandas con control de ganancia. Imagen propia.

Ilustración 3.16 Cara inferior de la placa fenólica. Imagen propia.

Ilustración 3.17 Cara superior de la placa fenólica. Imagen propia.

Ilustración 3.18 Cara superior de la placa fenólica. Imagen propia.

Ilustración 3.19 Cara inferior de la placa fenólica. Imagen propia.

Ilustración 3.20 Cara inferior de la placa fenólica. Imagen propia.

Ilustración 3.21 Cara superior de la placa fenólica. Imagen propia.

Ilustración 3.22 Interfaz gráfica de la aplicación. Imagen propia.

Ilustración 3.23 Diagrama de flujo de la función conectar. Imagen propia.

Ilustración 3.24 Bloques de la función conectar. Imagen propia.

Ilustración 3.25 Proceso de conexión Bluetooth. Imagen propia.

Ilustración 3.26 Diagrama de flujo del bloque de recepción en la aplicación. Imagen propia.

Ilustración 3.27 Bloque de recepción de información. Imagen propia.

Ilustración 3.28 Diagrama de la transmisión de la información. Imagen propia.

Ilustración 3.29 Bloque de instrucciones cuando un selector cambia de posición. Imagen propia.

Ilustración 3.30 Diagrama de bloques de la comunicación bidireccional. Imagen propia.

Ilustración 3.31 Esquemático de conexiones de la etapa de control digital. Imagen propia.

Ilustración 3.32 Diagrama de flujo del programa principal. Imagen propia.

Ilustración 3.33 Diagrama de flujo del modo convencional. Imagen propia.

Ilustración 3.34 Diagrama de flujo del modo inalámbrico. Imagen propia.

Ilustración 3.35 Diagrama del circuito amplificador de potencia. Imagen propia.

Ilustración 3.36 Diagrama del amplificador de potencia. Imagen propia.

Ilustración 3.37 PCB del amplificador de potencia. Imagen propia.

Ilustración 3.38 Esquema de la fuente de alimentación. Imagen propia.

Ilustración 3.39 Marcando las perforaciones. Imagen propia.

Ilustración 3.40 Perforaciones realizadas. Imagen propia.

Ilustración 3.41. Instalación de ventilador, asa y piezas 3D. Imagen propia.

Ilustración 3.42. Instalación de suelo, etapa de potencia, de alimentación y ventilador y acomodo de cables. Imagen propia.

Ilustración 3.43. Instalación de las últimas etapas. Imagen propia.

Ilustración 3.44. Proyecto finalizado. Imagen propia.

Ilustración 4.1 Pruebas con Arduino nano. Imagen propia.

Ilustración 4.2 Versión inicial de la aplicación. Imagen propia.

Ilustración 4.3 Conjunto de bloques de la versión inicial de la aplicación. Imagen propia.

Ilustración 4.4 Código de recepción en Arduino. Imagen propia.

Ilustración 4.5 Segunda versión la aplicación. Imagen propia.

Ilustración 4.6 Versión final de la aplicación. Imagen propia.

Ilustración 4.7 Configuración de cada slider. Imagen propia.

Ilustración 4.8 Código de prueba. Imagen propia.

Ilustración 4.9 Manipulación de los Sliders. Imagen propia.

Ilustración 4.10 Valores recibidos en Arduino. Imagen propia.

Ilustración 4.11 Botones. Imagen propia.

Ilustración 4.12 Letra B recibida en la aplicación. Imagen propia.

Ilustración 4.13 Letra A recibida en la aplicación. Imagen propia.

Ilustración 4.14 Señal de control repetida. Imagen propia.

Ilustración 4.15 Instrucciones adicionales para señales repetidas. Imagen propia.

Ilustración 4.16 Valores mostrados en el LCD. Imagen propia.

Ilustración 4.17 Valores mostrados en la aplicación. Imagen propia.

Ilustración 4.18 Respuesta del potenciómetro digital. Imagen propia.

Ilustración 4.19 Tone Stack Calculator. Imagen propia.

Ilustración 4.20 Prueba de funcionamiento del ecualizador de tres bandas con control de ganancia. Imagen propia.

Ilustración 4.21 Prueba del filtro pasa bajas a 100 Hz. Imagen propia.

Ilustración 4.22 Prueba del filtro pasa bajas a 500 Hz. Imagen propia.

Ilustración 4.23 Prueba del filtro pasa bajas a 1 KHz. Imagen propia.

Ilustración 4.24 Prueba del filtro pasa banda a 500 Hz. Imagen propia.

Ilustración 4.25 Prueba del filtro pasa banda a 1.4 KHz. Imagen propia.

Ilustración 4.26 Prueba del filtro pasa banda a 2 KHz. Imagen propia.

Ilustración 4.27 Prueba del filtro pasa altas a 1 KHz. Imagen propia.

Ilustración 4.28 Prueba del filtro pasa altas a 1.5 KHz. Imagen propia.

Ilustración 4.29 Prueba del filtro pasa bajas a 2.8 KHz. Imagen propia.

Ilustración 4.30 Filtros unificados por cables formando la etapa de ecualización de tres bandas con control de ganancia. Imagen propia.

Ilustración 4.30 Filtros unificados por cables formando la etapa de ecualización de tres bandas con control de ganancia. Imagen propia.

Ilustración 4.31 Comportamiento del filtro sin ganancia. Imagen propia.

Ilustración 4.32 Comportamiento del filtro con ganancia máxima. Imagen propia.

Ilustración 4.33 Ganancia máxima en el filtro pasa bajas. Imagen propia.

Ilustración 4.34 Ganancia máxima en el filtro pasa banda. Imagen propia.

Ilustración 4.35 Ganancia máxima en el filtro pasa altas. Imagen propia.

Ilustración 4.36 Primer PCB de la etapa de potencia Imagen propia.

Ilustración 4.37 Prueba de sonido con teléfono móvil. Imagen propia.

Ilustración 4.38 Pruebas con la guitarra. Imagen propia.

Ilustración 4.39 Prueba de funcionamiento de la fuente con los dispositivos analógicos y con audio proveniente de un dispositivo móvil. Imagen propia.

Ilustración 4.40 Prueba de funcionamiento de la fuente con los dispositivos analógicos y con audio proveniente de una guitarra electroacústica. Imagen propia.

Ilustración 4.41 Prueba con la fuente con todo el sistema conectado con audio de un dispositivo móvil. Imagen propia.

Ilustración 4.42 Pruebas con la fuente con todo el sistema conectado con audio de una guitarra electroacústica. Imagen propia.

Ilustración 4.43 Pruebas con reproductor de música. Imagen propia.

Ilustración 4.44. Pruebas con una guitarra electroacústica. Imagen propia.

Referencias

- [1] S. Catucci, *La historia de la música: sonidos, instrumentos, protagonistas*, Florencia: Malsinet Editor, 2001, p. 8.
- [2] R. L. Pajares Alonso, *Historia de la música en 6 bloques*, Madrid: Vision Libros, 2010, p. 519.
- [3] Consulta Mitofsky, «Consulta,» Junio 2014. [En línea]. Available: <http://www.consulta.mx/index.php/estudios-e-investigaciones/mexico-opina/item/570-musica-la-guitarra-es-la-reina-de-los-instrumentos>. [Último acceso: 20 Noviembre 2019].
- [4] kamikafre, «guitarristas,» 8 Agosto 2007. [En línea]. Available: <https://www.guitarristas.info/tutoriales/todo-sobre-amplificadores-guitarrero/33>. [Último acceso: 20 Noviembre 2019].
- [5] Marshall, «shop fender,» 2016. [En línea]. Available: <https://shop.fender.com/es-MX/guitar-amplifiers/contemporary-digital/mustang-gt-40/2310100000.html>. [Último acceso: 20 Noviembre 2019].
- [6] D. Bailos Aguirre y J. Goicoechea Fernández, «Diseño de un amplificador valvular con control inalámbrico,» Pamplona, 2017.
- [7] L. M. Pan Pérez-Villalobos, «Control y Shield para tarjeta de efectos de sonido SKRM-C8-G01 con Arduino,» Cartagena, 2016.
- [8] F. Pedrell, «Guitarra,» de *Diccionario técnico de la música*, Barcelona, Maxtor, 2009, p. 212.

- [9] L. MAGAZINE, «LACARNE MAGAZINE,» 16 Agosto 2019. [En línea]. Available: <https://lacarnemagazine.com/cuantos-tipos-de-guitarra-existen/>. [Último acceso: 24 Noviembre 2019]. [Último acceso: 24 Noviembre 2019].
- [10] Anónimo, «Wikipedia,» 21 Noviembre 2019. [En línea]. Available: https://es.wikipedia.org/wiki/Guitarra_el%C3%A9ctrica. [Último acceso: 25 Noviembre 19]. [Último acceso: 25 Noviembre 2019].
- [11] Anónimo, «COMOFUNCIONA,» 14 Junio 2018. [En línea]. Available: <https://comofunciona.co/una-guitarra-electrica/>. [Último acceso: 25 Noviembre 2019].
- [12] Anónimo, «Pastillas de Guitarra,» 2016. [En línea]. Available: <https://www.pastillasguitarra.es/tipos-pastillas-guitarra/>. [Último acceso: 25 Noviembre 2019].
- [13] M. Romero Dopico, de *AMPLIFICADOR A VÁLVULAS PARA GUITARRA ELÉCTRICA*, Madrid, UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID, 2011, pp. 19-20.
- [14] M. A. Maigua Terán, de *Diseño y construcción de una pedalera de guitarra digital basada en Raspberry Pi*, Quito, UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO, 2015, pp. 34-35.
- [15] M. F. Jorge, «academicos,» 2013. [En línea]. Available: <http://www.academicos.ccadet.unam.mx/jorge.marquez/cursos/Instrumentacion/AmplificadoresOperacionales.pdf>. [Último acceso: 27 Noviembre 2019].
- [16] A. Rufino, de *Aproximación y Síntesis de Filtros Elípticos*, Puebla, Universidad de las Américas Puebla, 2005, p. 9.
- [17] E. M. Balboa Morales y M. A. Sáez Saldías, de *Análisis, diseño y construcción de filtros activos*, Concepción, Universidad de Bío-Bío, 2016, pp. 8-22.

- [18] D. E. Hernández Reyes, ANÁLISIS Y DISEÑO DE FILTROS PASIVOS DE DOBLE SINTONIZACIÓN, Ciudad de México: UNAM, 2018.
- [19] G. Quiroz Córdova, de *Laboratorio Analógico*, Puebla, Universidad de las Américas Puebla, 2007, p. 13.
- [20] Y. C. Hernández N. y N. I. Landinez R., «CONSTRUCCIÓN DE UN AMPLIFICADOR DE POTENCIA PARA UN PROTOTIPO DE TRANSMISOR DE FM ESTÉREO CON CANALES DE SCA,» de *CONSTRUCCIÓN DE UN AMPLIFICADOR DE POTENCIA PARA UN PROTOTIPO DE TRANSMISOR DE FM ESTÉREO CON CANALES DE SCA*, Bárbula, UNIVERSIDAD DE CARABOBO, 2016, pp. 6-7.
- [21] [En línea]. Available: <https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/517665/TI1/LM3886.html>. [Último acceso: 14 03 2020].
- [22] Circuit Basics , «Circuit Basics,» Circuit Basics, [En línea]. Available: <http://www.circuitbasics.com/design-hi-fi-audio-amplifier-lm3886/>. [Último acceso: 22 Diciembre 2019].
- [23] L. Flórez C., «Sistemas,» de *Señales y sistemas. Una aproximación al laboratorio*, Bogotá, p. 29.
- [24] C. Angulo Bahón y C. Raya Ginar, «Principios básicos de la teoría de control,» de *Tecnologías de sistemas de control*, Barcelona, 2004, pp. 31-35.
- [25] A. S. Vázquez Fernández-Pacheco, F. Ramos de la Flor, R. Fernández Rodríguez , I. Payo Gutiérrez y A. Adán Oliver , «Definición de microcontrolador,» de *Robótica educativa*, Madrid, RA-MA, pp. 115-116.
- [26] E. López Aldea, «Arduino,» de *Arduino. Guía práctica de fundamentos y simulación* , Madrid, RA-MA, 2016, pp. 51,69.

- [27] «Arduino,» [En línea]. Available: <https://store.arduino.cc/usa/mega-2560-r3>. [Último acceso: 25 Noviembre 2019].
- [28] Ó. Torrente Artero, «Software Arduino,» de *ARDUINO. Curso práctico de formación*, Madrid, RC Libros, 2013, p. 129.
- [29] C. Peña Millahual, «Software Arduino,» de *Arduino*, Buenos Aires, Six Ediciones, 2017, p. 110.
- [30] «Arduino-LiquidCrystal,» [En línea]. Available: <https://www.arduino.cc/en/Reference/LiquidCrystal>. [Último acceso: 25 Noviembre 2019].
- [31] R. J. Flower, «Resistencias,» de *Electricidad. Principios y Aplicaciones*, EDITORIAL REVERTÉ, 1994, p. 73.
- [32] J. M. Miguelañez García, «Resistencias,» de *Electricidad básica para TMA-s*, Madrid, 2018, pp. 58-69.
- [33] N. C. Braga, «Potenciómetros,» de *Electrónica básica*, 2017, p. 79.
- [34] E. Lara, 10 Enero 2018. [En línea]. Available: <https://hetpro-store.com/TUTORIALES/potenciometro-digital-mcp4022/>. [Último acceso: 28 Noviembre 2019].
- [35] RENESAS, [En línea]. Available: <https://www.renesas.com/us/en/www/doc/datasheet/x9c102-103-104-503.pdf>. [Último acceso: 28 Noviembre 2019].
- [36] «ALPHANUMERIC LCD DISPLAY (16 X 2),» [En línea]. Available: <http://www.picaxe.com/docs/led008.pdf>. [Último acceso: 30 Noviembre 2019].

- [37] CDMX ELECTRÓNICA, [En línea]. Available: <https://www.cdmxelectronica.com/producto/bluetooth-hc-05-maestro-esclavo-6-pines/>. [Último acceso: 30 Noviembre 2019].
- [38] R. Fernández, «¿Qué es App Inventor?,» de *Programación de aplicaciones Android con App Inventor 2*, 2019.
- [39] A. Mesa Méndez, de *Tópicos selectos de Audio*, Santa Clara, UNIVERSIDAD CENTRAL MARTA ABREU DE LAS VILLAS, 2017, pp. 36-42.
- [40] C. Díaz, «ceduc,» [En línea]. Available: <https://www.ceduc.cl/aula/cqbo/materiales/EI/EI-170/Diseno%20de%20Fuentes%20de%20Alimentacion.pdf>. [Último acceso: 10 febrero 2020].

Anexos.

A. Código de Arduino.

```
#include <LiquidCrystal.h>

#include <DigiPotX9Cxxx.h>

DigiPot pote(3,2,4); // 4 CS , 2 U/D , 3 INC

DigiPot pote_uno(6,5,7); // 7 CS , 5 U/D , 6 INC

DigiPot pote_mid(33,35,31); // 31 CS , 35 U/D , 33 INC

DigiPot pote_tr(39,41,37); // 37 CS , 41 U/D , 39 INC

LiquidCrystal lcd(8,9,10,11,12,13); // RS 8,E 9,D4 10,D5 11,D6 12,D7 13

void setup()

{

pinMode(A1,INPUT);

pinMode(A2,INPUT);

pinMode(A3,INPUT);

pinMode(A4,INPUT);

pinMode(A5,INPUT);

pinMode(A6,INPUT);

pinMode(A7,INPUT);

pinMode(A8,INPUT);

Serial.begin(9600);

Serial1.begin(9600); //bluetooth

pote.set(99);

pote_uno.set(99);

pote_mid.set(99);
```

```
pote_tr.set(99);  
lcd.begin(16,2);  
lcd.print("Gain");  
lcd.setCursor(1,1);  
lcd.print("99");  
lcd.setCursor(5,0);  
lcd.print("Bass");  
lcd.setCursor(6,1);  
lcd.print("99");  
lcd.setCursor(10,0);  
lcd.print("Mid");  
lcd.setCursor(11,1);  
lcd.print("99");  
lcd.setCursor(14,0);  
lcd.print("Tr");  
lcd.setCursor(14,1);  
lcd.print("99");  
}
```

```
void loop()  
{  
  if(digitalRead(A9) == HIGH)  
  {  
    alambrico();  
  }  
}
```

```

}
else
{
  inalambrico();
}
}

void alambrico()
{
  lcd.setCursor(0,0);
  lcd.print("Gain");
  lcd.setCursor(5,0);
  lcd.print("Bass");
  lcd.setCursor(10,0);
  lcd.print("Mid");
  lcd.setCursor(14,0);
  lcd.print("Tr");

  bool boton_sc = digitalRead(A1);
  bool boton_uno_sc = digitalRead(A2);
  bool boton_dos_sc = digitalRead(A3);
  bool boton_tres_sc = digitalRead(A4);
  bool boton_cuatro_sc = digitalRead(A5);
  bool boton_cinco_sc = digitalRead(A6);
  bool boton_seis_sc = digitalRead(A7);
  bool boton_siete_sc = digitalRead(A8);

```

```

if(boton_sc == HIGH)
{
delay(100);

byte pote_val = pote.get();

pote_val = pote_val + 1;

if(pote_val <= 99 && pote_val >= 0)
{
pote.set(pote_val);

lcd.setCursor(2,1);

lcd.print(" ");

lcd.setCursor(1,1);

lcd.print(pote_val);

}

}

if(boton_uno_sc == HIGH)
{
delay(100);

byte pote_val = pote.get();

pote_val = pote_val - 1;

if(pote_val <= 99 && pote_val >= 0)
{
pote.set(pote_val);

lcd.setCursor(2,1);

lcd.print(" ");

```

```

lcd.setCursor(1,1);

lcd.print(pote_val);

}

}

if(boton_dos_sc == HIGH)

{

delay(100);

byte pote_bass_val = pote_uno.get();

pote_bass_val = pote_bass_val + 1;

if(pote_bass_val <= 99 && pote_bass_val >= 0)

{

pote_uno.set(pote_bass_val);

lcd.setCursor(7,1);

lcd.print(" ");

lcd.setCursor(6,1);

lcd.print(pote_bass_val);

}

}

if(boton_tres_sc == HIGH)

{

delay(100);

byte pote_bass_val = pote_uno.get();

pote_bass_val = pote_bass_val - 1;

if(pote_bass_val <= 99 && pote_bass_val >= 0)

```

```

{
pote_uno.set(pote_bass_val);
lcd.setCursor(7,1);
lcd.print(" ");
lcd.setCursor(6,1);
lcd.print(pote_bass_val);
}
}

if(boton_cuatro_sc == HIGH)
{
delay(100);
byte pote_mid_val = pote_mid.get();
pote_mid_val = pote_mid_val + 1;
if(pote_mid_val <= 99 && pote_mid_val >= 0)
{
pote_mid.set(pote_mid_val);
lcd.setCursor(12,1);
lcd.print(" ");
lcd.setCursor(11,1);
lcd.print(pote_mid_val);
}
}

if(boton_cinco_sc == HIGH)
{

```

```

delay(100);

byte pote_mid_val = pote_mid.get();

pote_mid_val = pote_mid_val - 1;

if(pote_mid_val <= 99 && pote_mid_val >= 0)
{
pote_mid.set(pote_mid_val);

lcd.setCursor(12,1);

lcd.print(" ");

lcd.setCursor(11,1);

lcd.print(pote_mid_val);
}
}

if(boton_seis_sc == HIGH)
{
delay(100);

byte pote_tr_val = pote_tr.get();

pote_tr_val = pote_tr_val + 1;

if(pote_tr_val <= 99 && pote_tr_val >= 0)
{
pote_tr.set(pote_tr_val);

lcd.setCursor(15,1);

lcd.print(" ");

lcd.setCursor(14,1);

lcd.print(pote_tr_val);
}
}

```

```

}
}
if(boton_siete_sc == HIGH)
{
delay(100);

byte pote_tr_val = pote_tr.get();
pote_tr_val = pote_tr_val - 1;
if(pote_tr_val <= 99 && pote_tr_val >= 0)
{
pote_tr.set(pote_tr_val);
lcd.setCursor(15,1);
lcd.print(" ");
lcd.setCursor(14,1);
lcd.print(pote_tr_val);
}
}
}

void inalambrico()
{
lcd.setCursor(0,0);
lcd.print("Gain");
lcd.setCursor(5,0);
lcd.print("Bass");
lcd.setCursor(10,0);

```

```

lcd.print("Mid");

lcd.setCursor(14,0);

lcd.print("Tr");

while(Serial1.available()>0)
{
int pote_gain = Serial1.parseInt();
int pote_bass = Serial1.parseInt();
int pote_midd = Serial1.parseInt();
int pote_tre = Serial1.parseInt();

if (Serial1.read() == '\n')
{
pote.set(pote_gain);

lcd.setCursor(2,1);

lcd.print(" ");

lcd.setCursor(1,1);

lcd.print(pote_gain);

pote_uno.set(pote_bass);

lcd.setCursor(7,1);

lcd.print(" ");

lcd.setCursor(6,1);

lcd.print(pote_bass);

pote_mid.set(pote_midd);

lcd.setCursor(12,1);

```

```

lcd.print(" ");

lcd.setCursor(11,1);

lcd.print(pote_midd);

pote_tr.set(pote_tre );

lcd.setCursor(15,1);

lcd.print(" ");

lcd.setCursor(14,1);

lcd.print(pote_tre);

}

break;

}

if(Serial.available() == 0)
{
bool boton = digitalRead(A1);

bool boton_uno = digitalRead(A2);

bool boton_dos = digitalRead(A3);

bool boton_tres = digitalRead(A4);

bool boton_cuatro = digitalRead(A5);

bool boton_cinco = digitalRead(A6);

bool boton_seis = digitalRead(A7);

bool boton_siete = digitalRead(A8);

if(boton == HIGH)

```

```
{
delay(100);
Serial1.print("A");
}

if(boton_uno == HIGH)
{
delay(100);
Serial1.print("B");
}

if(boton_dos == HIGH)
{
delay(100);
Serial1.print("C");
}

if(boton_tres == HIGH)
{
delay(100);
Serial1.print("D");
}

if(boton_cuatro == HIGH)
{
delay(100);
Serial1.print("E");
}
```

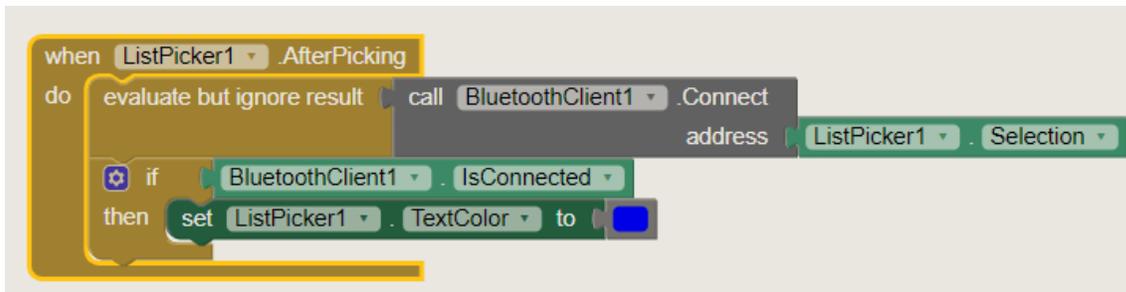
```
if(boton_cinco == HIGH)
{
delay(100);
Serial1.print("F");
}
if(boton_seis == HIGH)
{
delay(100);
Serial1.print("G");
}
if(boton_siete == HIGH)
{
delay(100);
Serial1.print("H");
}
} }
```

B. Código de la aplicación.

CONEXIÓN BLUETOOTH.

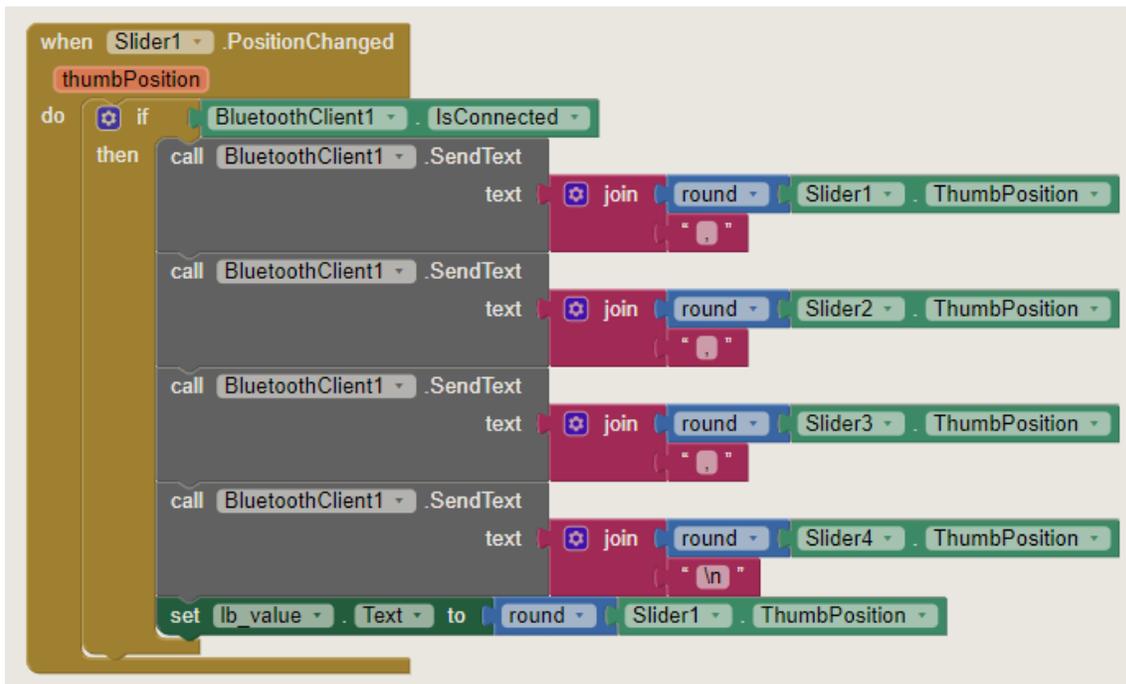


```
when ListPicker1 .BeforePicking
do
  if BluetoothClient1 . Available
  then
    set ListPicker1 . Elements to BluetoothClient1 . AddressesAndNames
```



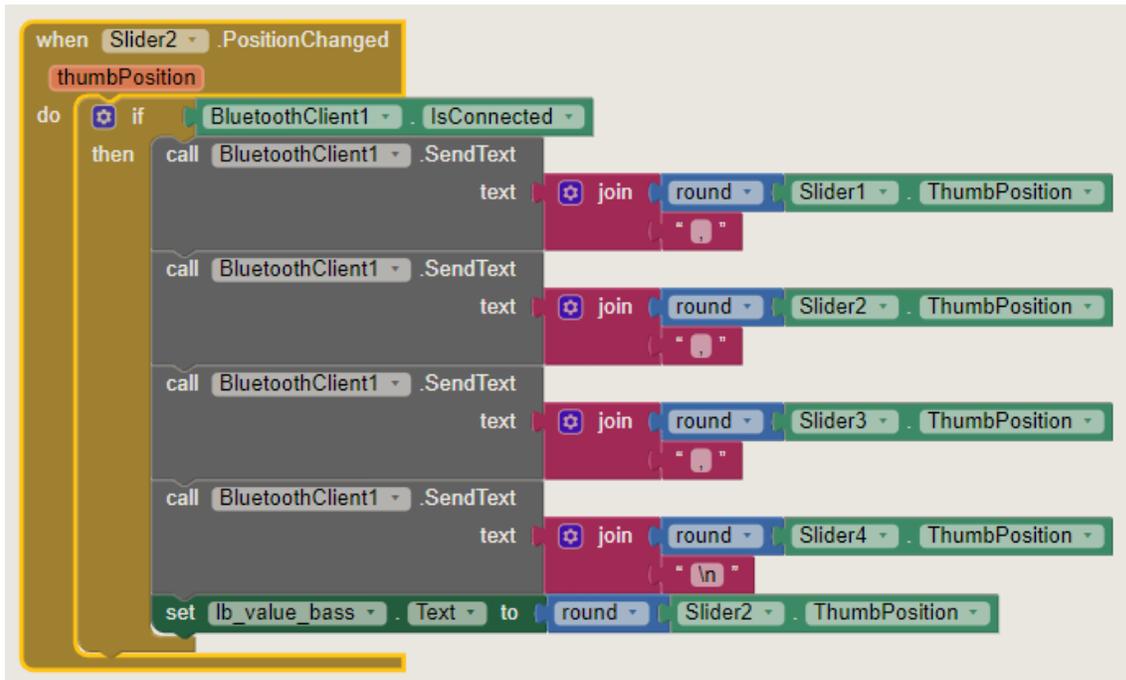
```
when ListPicker1 .AfterPicking
do
  evaluate but ignore result call BluetoothClient1 . Connect
  address ListPicker1 . Selection
  if BluetoothClient1 . IsConnected
  then
    set ListPicker1 . TextColor to blue
```

CUANDO EL SLIDER 1 CAMBIA DE POSICIÓN.



```
when Slider1 . PositionChanged
  thumbPosition
do
  if BluetoothClient1 . IsConnected
  then
    call BluetoothClient1 . SendText
    text join round Slider1 . ThumbPosition
    call BluetoothClient1 . SendText
    text join round Slider2 . ThumbPosition
    call BluetoothClient1 . SendText
    text join round Slider3 . ThumbPosition
    call BluetoothClient1 . SendText
    text join round Slider4 . ThumbPosition
    set lb_value . Text to round Slider1 . ThumbPosition
```

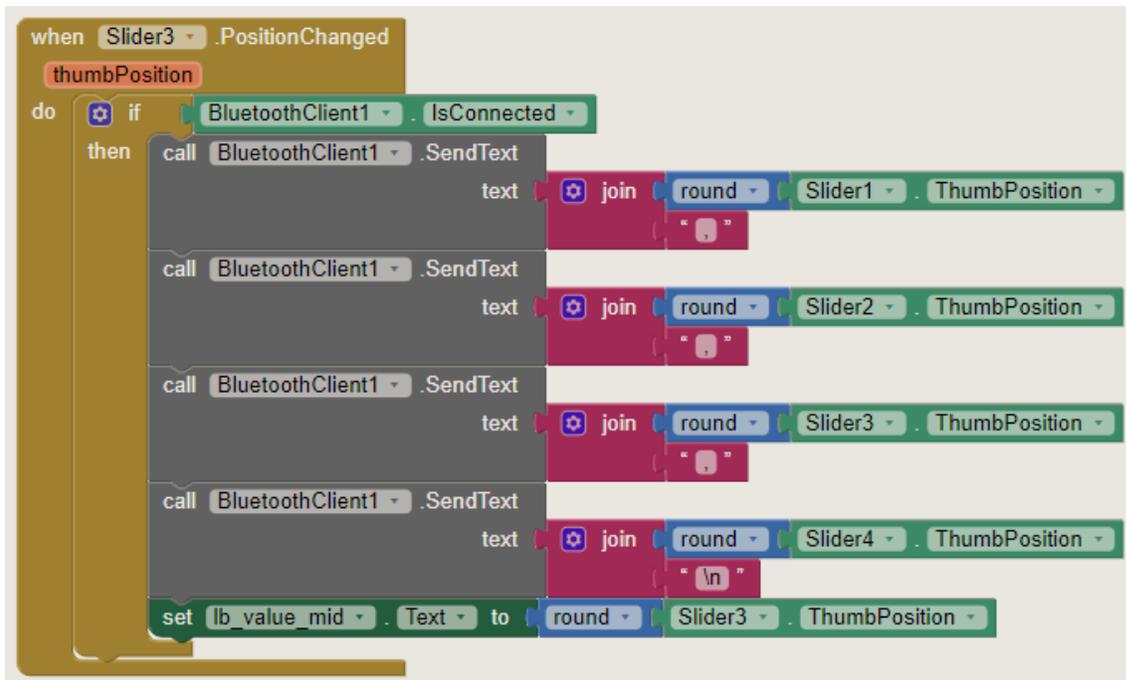
CUANDO EL SLIDER 2 CAMBIA DE POSICIÓN.



```
when Slider2 .PositionChanged
  thumbPosition
do
  if BluetoothClient1 .IsConnected
  then
    call BluetoothClient1 .SendText
      text join round Slider1 .ThumbPosition
      " "
    call BluetoothClient1 .SendText
      text join round Slider2 .ThumbPosition
      " "
    call BluetoothClient1 .SendText
      text join round Slider3 .ThumbPosition
      " "
    call BluetoothClient1 .SendText
      text join round Slider4 .ThumbPosition
      "\n"
    set lb_value_bass .Text to round Slider2 .ThumbPosition
```

The image shows a Scratch script starting with a 'when Slider2 .PositionChanged' event. A 'thumbPosition' variable is declared. A 'do' loop contains an 'if BluetoothClient1 .IsConnected' condition. If true, four 'call BluetoothClient1 .SendText' blocks are executed, each with a 'text' block containing a 'join' block (with a 'round' block and a slider's 'ThumbPosition' block) followed by a space character. The sliders are Slider1, Slider2, Slider3, and Slider4. Finally, a 'set lb_value_bass .Text to' block is used to update the text of 'lb_value_bass' with the rounded 'ThumbPosition' of Slider2.

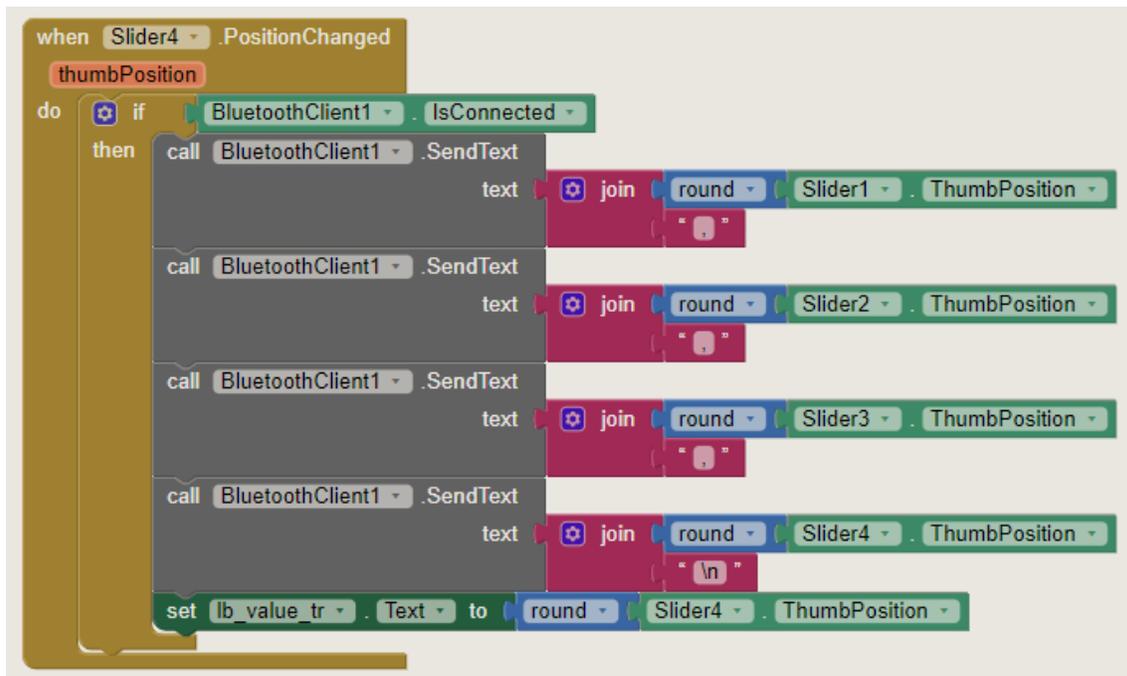
CUANDO EL SLIDER 3 CAMBIA DE POSICIÓN.



```
when Slider3 .PositionChanged
  thumbPosition
do
  if BluetoothClient1 .IsConnected
  then
    call BluetoothClient1 .SendText
      text join round Slider1 .ThumbPosition
      " "
    call BluetoothClient1 .SendText
      text join round Slider2 .ThumbPosition
      " "
    call BluetoothClient1 .SendText
      text join round Slider3 .ThumbPosition
      " "
    call BluetoothClient1 .SendText
      text join round Slider4 .ThumbPosition
      "\n"
    set lb_value_mid .Text to round Slider3 .ThumbPosition
```

The image shows a Scratch script starting with a 'when Slider3 .PositionChanged' event. A 'thumbPosition' variable is declared. A 'do' loop contains an 'if BluetoothClient1 .IsConnected' condition. If true, four 'call BluetoothClient1 .SendText' blocks are executed, each with a 'text' block containing a 'join' block (with a 'round' block and a slider's 'ThumbPosition' block) followed by a space character. The sliders are Slider1, Slider2, Slider3, and Slider4. Finally, a 'set lb_value_mid .Text to' block is used to update the text of 'lb_value_mid' with the rounded 'ThumbPosition' of Slider3.

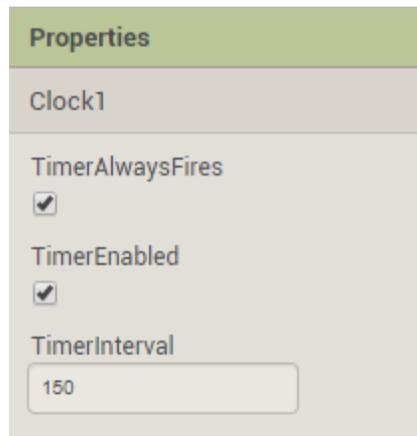
CUANDO EL SLIDER 4 CAMBIA DE POSICIÓN.



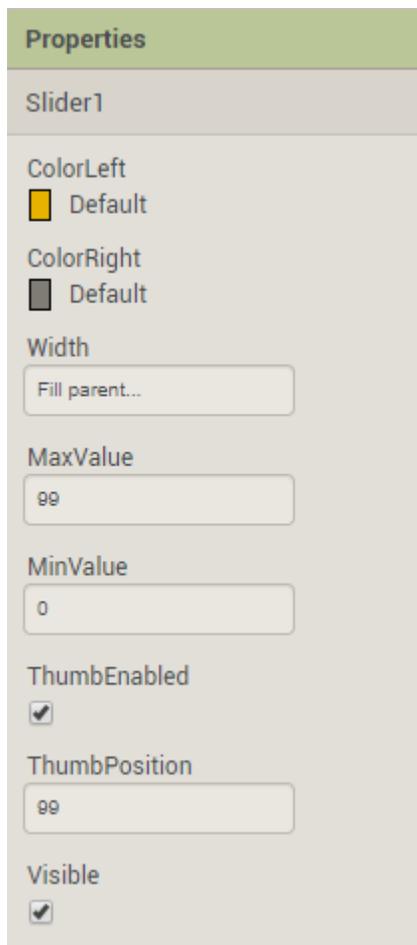
RECEPCIÓN DE INFORMACIÓN.

```
when Clock1 .Timer
do
  if BluetoothClient1 .IsConnected
  then
    if call BluetoothClient1 .BytesAvailableToReceive > 0
    then
      initialize local letra to call BluetoothClient1 .ReceiveText
      numberOfBytes call BluetoothClient1 .BytesAvailableToReceive
      in
        if get letra = "A"
        then set Slider1 .ThumbPosition to round Slider1 .ThumbPosition + 1
        else if get letra = "AA"
        then set Slider1 .ThumbPosition to round Slider1 .ThumbPosition + 1
        else if get letra = "B"
        then set Slider1 .ThumbPosition to round Slider1 .ThumbPosition - 1
        else if get letra = "BB"
        then set Slider1 .ThumbPosition to round Slider1 .ThumbPosition - 1
        else if get letra = "C"
        then set Slider2 .ThumbPosition to round Slider2 .ThumbPosition + 1
        else if get letra = "CC"
        then set Slider2 .ThumbPosition to round Slider2 .ThumbPosition + 1
        else if get letra = "D"
        then set Slider2 .ThumbPosition to round Slider2 .ThumbPosition - 1
        else if get letra = "DD"
        then set Slider2 .ThumbPosition to round Slider2 .ThumbPosition - 1
        else if get letra = "E"
        then set Slider3 .ThumbPosition to round Slider3 .ThumbPosition + 1
        else if get letra = "EE"
        then set Slider3 .ThumbPosition to round Slider3 .ThumbPosition + 1
        else if get letra = "F"
        then set Slider3 .ThumbPosition to round Slider3 .ThumbPosition - 1
        else if get letra = "FF"
        then set Slider3 .ThumbPosition to round Slider3 .ThumbPosition - 1
        else if get letra = "G"
        then set Slider4 .ThumbPosition to round Slider4 .ThumbPosition + 1
        else if get letra = "GG"
        then set Slider4 .ThumbPosition to round Slider4 .ThumbPosition + 1
        else if get letra = "H"
        then set Slider4 .ThumbPosition to round Slider4 .ThumbPosition - 1
        else if get letra = "HH"
        then set Slider4 .ThumbPosition to round Slider4 .ThumbPosition - 1
```

CONFIGURACIÓN DEL TIMER.



CONFIGURACIÓN DEL SLIDER 1,2,3 Y 4.



C. Lista de material.

Cantidad	Concepto	Valor unitario M.N. [\$]	Total [\$]
1	Arduino Mega 2560 con cable USB	299	299
6	OPA2134PA	89.58	544.32
5	Manufactura de PCB	31.43	157.15
5	Manufactura de PCB	44.45	222.28
5	Manufactura de PCB	7.66	38.32
1	Flete PCB	410.44	410.44
3	Potenciómetro digital X9C103S	35	105
1	LM 3886T/NOPB	202	202
1	Bocina Celestion Vintage 30 70W, 8 ohm, 12 pulgadas	3,083.3	3,083.3
1	Gabinete para guitarra	1500	1500
1	Manufactura de caja de acrílico	980	980
2	Ventiladores de 12 volt	80	160
2	Cable para guitarra	350	700
1	Cable para audio	80	80
8	Botones push pull	8	64

2	Jack de 6.5mm	5	10
1	Jack de 3.5mm	5	5
1	Pliego de papel batería grueso	75	75
1	Display 16x2	35	35
2	Botones de encendido/pagado	15	30
Total			8700.81