



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN SISTEMAS ELECTRÓNICA E**  
**INDUSTRIAL**  
**CARRERA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA Y COMUNICACIONES**

**Tema:**

---

“SISTEMA DE AMPLIFICACIÓN HI-RES CON TRANSMISIÓN  
INALÁMBRICA DE AUDIO EMPLEANDO EL PROTOCOLO PUREPATH  
WIRELESS”

---

Proyecto de Graduación. Modalidad: Proyecto de Investigación, presentado previo la  
obtención del título de Ingeniera en Electrónica y Comunicaciones.

Línea de Investigación: Sistemas Electrónicos  
Autora: Doménica Nicole Salinas Robalino  
Tutor: Ing. Mg. Edgar Patricio Córdova Córdova

Ambato - Ecuador

Diciembre, 2019

## APROBACIÓN DEL TUTOR

En mi calidad de tutor del Trabajo de Investigación con el tema: “SISTEMA DE AMPLIFICACIÓN HI-RES CON TRANSMISIÓN INALÁMBRICA DE AUDIO EMPLEANDO EL PROTOCOLO PUREPATH WIRELESS”, de la señorita Doménica Nicole Salinas Robalino, estudiante de la Carrera de Ingeniería en Electrónica y Comunicaciones, de la Facultad de Ingeniería en Sistemas, Electrónica e Industrial, de la Universidad Técnica de Ambato, considero que el informe investigativo reúne los requisitos suficientes para que continúe con los trámites y consiguiente aprobación de conformidad con el numeral 7.2 de los Lineamientos Generales para la aplicación de Instructivos de las Modalidades de Titulación de las Facultades de la Universidad Técnica de Ambato.

Ambato, enero 2020

EL TUTOR

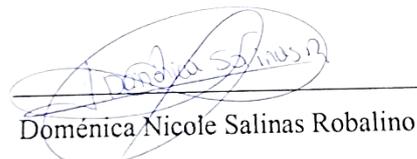
A handwritten signature in blue ink, consisting of a large, stylized 'P' followed by a horizontal line and some smaller, less distinct characters.

Ing. Mg. Patricio Córdova.

## AUTORÍA

El presente Proyecto de Investigación titulado: “SISTEMA DE AMPLIFICACIÓN HI-RES CON TRANSMISIÓN INALÁMBRICA DE AUDIO EMPLEANDO EL PROTOCOLO PUREPATH WIRELESS”, es absolutamente original, auténtico y personal, en tal virtud, el contenido, efectos legales y académicos que se desprenden del mismo son de exclusiva responsabilidad del autor.

Ambato, enero 2020



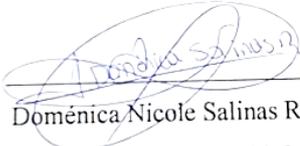
Doménica Nicole Salinas Robalino  
C.C. 180330898-8

## DERECHOS DE AUTOR

Autorizo a la Universidad Técnica de Ambato, para que haga uso de este Trabajo de Titulación como un documento disponible para la lectura, consulta y procesos de investigación.

Cedo los derechos de mi Trabajo de Titulación, con fines de difusión pública, además autorizo su reproducción dentro de las regulaciones de la Universidad.

Ambato, enero 2020



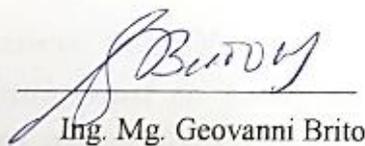
Doménica Nicole Salinas Robalino  
C.C. 180330898-8

## APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE GRADO

La Comisión Calificadora del presente trabajo *conformada por los señores docentes Ing. Geovanni Brito e Ing. Mario García*, revisó y aprobó el Informe Final del Proyecto de Investigación titulado **“Sistema de amplificación Hi-Res con inalámbrica de audio empleando el protocolo Purepath Wireless”** presentado por la señorita Doménica Nicole Salinas Robalino de acuerdo al numeral 9.1 de los Lineamientos Generales para la Aplicación de Instructivos de las Modalidades de Titulación de las Facultades de la Universidad Técnica de Ambato.



Ing. Mg. Elsa Pilar Urrutia Urrutia  
PRESIDENTE DEL TRIBUNAL



Ing. Mg. Geovanni Brito  
DOCENTE CALIFICADOR



Ing. Mg. Mario Garcia  
DOCENTE CALIFICADOR

## DEDICATORIA

*El presente trabajo de investigación se lo dedico a mi familia por darme su apoyo incondicionalmente, y que con su amor y esfuerzo fue posible cumplir uno de mis sueños.*

*A mi padre, Gustavo Salinas Espinosa, por ser uno de los pilares de mi vida y mi familia, por ser mi maestro y amigo, en quien encuentro amor, apoyo y enseñanzas.*

*A mi madre, Elizabeth Robalino Velasco, por ser la mujer más importante de mi vida, y mi mejor amiga, quien me ha acompañado en cada paso brindándome amor y cariño, por ser mi refugio en las adversidades y participe de todos mis logros y momentos de alegría.*

*A mi hermano, Gustavo Salinas Robalino, quien ha estado junto a mí en momentos de alegría y tristeza, por ser con quien puedo contar siempre que lo he necesitado brindándome sus consejos.*

*A mi abuelita, Anita Velasco Naranjo, una mujer luchadora y amorosa, quien me enseñó a ver que el mundo no se termina por no poder vivir como los demás, por mostrarme siempre el lado bueno de los problemas, por todo su amor y cariño.*

*A Gabriel Tello Valencia, un hombre especial en mi vida, por ser incondicional en todas las circunstancias, por todo el amor y apoyo, quien dedicó su tiempo a ayudarme en lo posible durante*

*la carrera, y por brindarme fortaleza en cada momento de declive y cansancio.*

Doménica Salinas Robalino

### **AGRADECIMIENTO**

*Agradezco a mis padres y mi hermano por todo el apoyo que me brindaron durante el desarrollo del presente trabajo, por su amor y cariño incondicional.*

*A mi novio, Gabriel Tello por ser mi apoyo y refugio día a día, por creer en mí, y ayudarme hasta el último momento en todo lo posible.*

*A mi tutor Ing. Patricio Córdova, por su buena disposición y tiempo dedicado para llevar a cabo con éxito el presente trabajo.*

*A mi amigo, Jonathan Santamaría por el apoyo durante el proceso de investigación.*

Doménica Salinas Robalino

## ÍNDICE GENERAL DE CONTENIDOS

APROBACIÓN DEL TUTOR _____	¡Error! Marcador no definido.
AUTORÍA _____	¡Error! Marcador no definido.
APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE GRADO _____	iv
DEDICATORIA _____	vi
AGRADECIMIENTO _____	vii
ÍNDICE GENERAL DE CONTENIDOS _____	viii
ÍNDICE DE TABLAS _____	x
ÍNDICE DE FIGURAS _____	xii
RESUMEN EJECUTIVO _____	15
ABSTRACT _____	16

### CAPÍTULO I

#### MARCO TEÓRICO

1.1. Antecedentes Investigativos _____	17
1.1.1. Estudio del arte _____	17
1.1.2. Fundamentación teórica _____	20
1.2. Objetivos _____	54
1.2.1. Objetivo General _____	54
1.2.2. Objetivos Específicos _____	54
1.2.3. Descripción de los objetivos _____	54

### CAPÍTULO II

#### METODOLOGÍA

2.1. Materiales _____	58
-----------------------	----

2.2.	Métodos	65
2.2.1.	Modalidad de la Investigación	65
2.2.2.	Recolección de Información	66
2.2.3.	Procesamiento y Análisis de Datos	66
2.2.4.	Desarrollo del proyecto	66

### **CAPÍTULO III**

#### **RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

3.1.	Análisis y discusión de los resultados	68
3.2.	Desarrollo de la propuesta	99

### **CAPÍTULO IV**

#### **CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

4.1.	Conclusiones	133
4.2.	Recomendaciones	135

#### **MATERIALES DE REFERENCIA**

	Referencias Bibliográficas	136
	Anexos	141

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> Principales distorsiones en amplificadores _____	21
<b>Tabla 2.</b> Ventajas y desventajas del amplificador clase A _____	23
<b>Tabla 3.</b> Ventajas y desventajas del amplificador clase B _____	25
<b>Tabla 4.</b> Ventajas y desventajas del amplificador clase AB _____	27
<b>Tabla 5.</b> Ventajas y desventajas del amplificador clase D _____	29
<b>Tabla 6.</b> Ventajas y desventajas del amplificador clase H _____	31
<b>Tabla 7.</b> Conceptos de Transmisión de audio _____	37
<b>Tabla 8.</b> Conceptos de Transmisión de audio _____	39
<b>Tabla 9.</b> Estándares de PurePath Wireless _____	41
<b>Tabla 10.</b> Velocidad del sonido de acuerdo a la temperatura _____	46
<b>Tabla 11.</b> Octavas _____	47
<b>Tabla 12.</b> Espectro audible _____	47
<b>Tabla 13.</b> Clasificación del sonido _____	49
<b>Tabla 14.</b> Instrumento de medición _____	50
<b>Tabla 15.</b> Sistemas de audio digital _____	51
<b>Tabla 16.</b> Filtro pasa alto en audio _____	52
<b>Tabla 17.</b> Filtro Pasa bajo en audio _____	52
<b>Tabla 18.</b> Tecnología inalámbrica a emplear _____	58
<b>Tabla 19.</b> Clase de amplificador a emplear _____	59
<b>Tabla 20.</b> Clase de amplificador a emplear _____	62
<b>Tabla 21.</b> Selección de crossover _____	63
<b>Tabla 22.</b> Selección de transistores de potencia _____	64
<b>Tabla 23.</b> Mediciones de Voltaje de Salida para el rango de bajos _____	69
<b>Tabla 24.</b> Mediciones de Voltaje de Salida para el rango de altos _____	70
<b>Tabla 25.</b> Medición de Voltaje de Salida para el rango de medios _____	71
<b>Tabla 26.</b> Estimación lineal para valores de voltaje de salida. _____	76
<b>Tabla 27.</b> Estimación lineal para valores de Potencia RMS _____	77
<b>Tabla 28.</b> Valores de PMPO del rango de frecuencias bajas _____	79
<b>Tabla 29.</b> Valores de PMPO del rango de frecuencias medias _____	79
<b>Tabla 30.</b> Valores de PMPO del rango de frecuencias altas _____	81
<b>Tabla 31.</b> Estimación lineal para valores de Potencia PMPO _____	84

<b>Tabla 32.</b> Mediciones de valores de Temperatura _____	85
<b>Tabla 33..</b> Valores establecidos en el generador de señales _____	91
<b>Tabla 34.</b> Mediciones SPL de calibración _____	97
<b>Tabla 35.</b> Reemplazos de elementos empleados en el amplificador de audio _____	118
<b>Tabla 36.</b> Presupuesto de construcción del prototipo _____	131
<b>Tabla 37.</b> Presupuesto Total _____	132

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Distorsión no lineal	20
<b>Figura 2.</b> Distorsión en frecuencia	21
<b>Figura 3.</b> Distorsión en fase	21
<b>Figura 4.</b> Esquema típico de amplificador clase A	24
<b>Figura 5.</b> Comportamiento de un amplificador clase A	24
<b>Figura 6.</b> Esquema típico de amplificador clase B	26
<b>Figura 7.</b> Comportamiento de amplificación clase B	26
<b>Figura 8.</b> Esquema típico de amplificador clase AB	28
<b>Figura 9.</b> Comportamiento de amplificación clase AB	28
<b>Figura 10.</b> Esquema típico de amplificador clase D	30
<b>Figura 11.</b> Comportamiento de amplificador clase D	30
<b>Figura 12.</b> Esquema típico de amplificador clase H	32
<b>Figura 13.</b> Generación de PWM en amplificador clase H	32
<b>Figura 14.</b> Digitalización de una señal analógica con PCM	34
<b>Figura 15.</b> Transmisión direccional	38
<b>Figura 16.</b> Transmisión Omnidireccional	38
<b>Figura 17.</b> Filtro Shelving	53
<b>Figura 18.</b> Filtro Peak y Bell	53
<b>Figura 19.</b> Dev Kit CC85XX	60
<b>Figura 20.</b> Placa CC85XX	61
<b>Figura 21.</b> Conexión Debugger	61
<b>Figura 22.</b> Crossover YLY-2088	64
<b>Figura 23.</b> Mediciones de Voltaje de salida	73
<b>Figura 24.</b> Valores de Potencia RMS	74
<b>Figura 25.</b> Tipos de potencia según especificaciones de audio	78
<b>Figura 26.</b> Valores de Potencia PMPO	83
<b>Figura 27.</b> Mediciones de temperatura de trabajo del dispositivo	87
<b>Figura 28.</b> Medición de distancia con Línea de vista directa	88
<b>Figura 29.</b> Medición de distancia sin Línea de vista directa	89
<b>Figura 30.</b> Onda transmitida en el canal izquierdo	91
<b>Figura 31.</b> Onda transmitida en el canal derecho	92

<b>Figura 32.</b> Onda receptada en el canal izquierdo _____	92
<b>Figura 33.</b> Onda receptada en el canal derecho _____	93
<b>Figura 34.</b> Onda de entrada y salida del amplificador con entrada de ruido blanco	94
<b>Figura 35.</b> Onda de entrada y salida del amplificador con entrada de ruido rosa	94
<b>Figura 36.</b> Onda de entrada y salida del amplificador con entrada de 1 kHz	95
<b>Figura 37.</b> Ubicación de equipos para calibración _____	96
<b>Figura 38.</b> Medición inicial de la calibración _____	97
<b>Figura 39.</b> Prueba de calibración _____	98
<b>Figura 40.</b> Prueba de calibración _____	98
<b>Figura 41.</b> Esquema de componentes del sistema de amplificación _____	99
<b>Figura 42.</b> Diseño de etapa de amplificación de señal _____	100
<b>Figura 43.</b> Señal de entrada _____	102
<b>Figura 44.</b> Mediciones en el preamplificador con CI TL071 _____	103
<b>Figura 45.</b> Diseño de etapa de amplificación de corriente y corrección de bias	104
<b>Figura 46.</b> Amplificación de corriente en Q1 _____	105
<b>Figura 47.</b> Amplificación de corriente en Q2 _____	105
<b>Figura 48.</b> Amplificación de corriente en Q3 _____	105
<b>Figura 49.</b> Amplificación de corriente en Q4 _____	106
<b>Figura 50.</b> Diseño de etapa de protección de salida _____	106
<b>Figura 51.</b> Diseño de etapa de amplificación AB _____	108
<b>Figura 52.</b> Red Zobel _____	109
<b>Figura 53.</b> Medición de entrada y salida de voltaje _____	111
<b>Figura 54.</b> Diseño del preamplificador de audio _____	112
<b>Figura 55.</b> Circuito Impreso de amplificador _____	116
<b>Figura 56.</b> Esquema pictórico del amplificador _____	116
<b>Figura 57.</b> Diagrama esquemático del amplificador _____	117
<b>Figura 58.</b> Circuito Impreso del preamplificador _____	118
<b>Figura 59.</b> Esquema pictórico del preamplificador _____	119
<b>Figura 60.</b> Diagrama esquemático del preamplificador _____	119
<b>Figura 61.</b> PurePath Wireless Configurator _____	121
<b>Figura 62.</b> Creación de proyecto _____	121
<b>Figura 63.</b> Creación de proyecto _____	122
<b>Figura 64.</b> Interfaz de audio externa del maestro _____	123

<b>Figura 65.</b> Forma de onda para Interfaz de audio externa del maestro _____	123
<b>Figura 66.</b> Configuración de streaming del maestro _____	123
<b>Figura 67.</b> Identificación de dispositivos _____	124
<b>Figura 68.</b> Asignación de esclavos _____	124
<b>Figura 69.</b> Tasa de transmisión de datos _____	125
<b>Figura 70.</b> Mapeo de puertos en dispositivo maestro _____	125
<b>Figura 71.</b> Generación de firmware para tarjeta maestro _____	126
<b>Figura 72.</b> Configuración del dispositivo esclavo _____	126
<b>Figura 73.</b> Interfaz de audio del dispositivo esclavo _____	127
<b>Figura 74.</b> Streaming del audio en el dispositivo esclavo _____	127
<b>Figura 75.</b> Mapeo de puertos en dispositivo esclavo 1 _____	128
<b>Figura 76.</b> Mapeo de puertos en dispositivo esclavo 2 _____	128
<b>Figura 77.</b> Puntos de medición del amplificador de audio _____	144
<b>Figura 78.</b> Diseño del módulo del amplificador _____	145

## RESUMEN EJECUTIVO

La implementación de dispositivos inalámbricos que permitan satisfacer necesidades en diferentes ámbitos de la vida cotidiana es de gran importancia en la actualidad, por lo cual la presente investigación propuso la elaboración de un sistema de amplificación HI-RES con transmisión inalámbrica de audio empleando el protocolo PurePath Wireless.

El sistema de amplificación incluyó tarjetas del kit de desarrollo CC85XX de Texas Instruments que permiten la transmisión inalámbrica de audio de alta calidad y sin compresión, brindando la posibilidad de crear redes e interconexiones entre dispositivos de acuerdo a la programación de imágenes firmware. Además, para conservar la calidad de audio que provee la tecnología PurePath Wireless se desarrolló un amplificador de clase AB en conjunto con preamplificadores y croosovers pasivos, para evitar ruido en las cajas amplificadas.

**Palabras clave:** Amplificador clase AB, Transmisión inalámbrica de audio, PurePath Wireless, HI-RES, Punto a multipunto.

## ABSTRACT

Nowadays, it is important to implement wireless devices in order to satisfy the different needs of daily life. The present research proposes the development of a HI-RES amplification system, which has wireless audio transmission by using the PurePath Wireless protocol.

The amplification system includes CC85XX development kit devices from Texas Instruments, which allows transmitting high-quality and uncompressed wireless audio. In addition, it makes possible to create networks and interconnections between devices according to firmware image programming. Furthermore, in order to preserve the audio quality provided by PurePath Wireless technology, an AB amplifier, passive preamps and croosovers were developed with the purpose of avoiding noise on the amplified speakers.

**Key words:** AB amplifier, Wireless audio transmission, PurePath Wireless, HI-RES, Point to multipoint.

# CAPÍTULO I

## MARCO TEÓRICO

### 1.1. Antecedentes Investigativos

#### 1.1.1. Estudio del arte

En el presente proyecto de investigación se analizaron trabajos y artículos referentes a los siguientes temas:

- Sistemas de amplificación
- Sistemas de transmisión de audio
- Sistemas de transmisión de audio inalámbrico

En la ciudad de México, Dalia Hernández Alemán, Iván Flores Melchor y Roberto Torres Hernández en diciembre de 2012 realizaron una investigación acerca de un “Sistema Inalámbrico de transmisión de audio con aplicación a Domótica”, la finalidad del estudio se basó en tener un hogar con confort y facilitar la vida de las familias con la automatización integrándola con las comunicaciones inalámbricas para brindar un servicio de entretenimiento y ocio mediante dispositivos multimedia. La topología empleada fue de una red estrella, en la que se incluyó la tecnología PurePath para la transmisión de audio desde un único maestro a varios esclavos en la banda de 2.4GHz con una modulación 8FSK con tasa 5/6, dicho número de esclavos fue asignado en la red configurada en la placa maestro. En cuanto al hardware de dispositivos multimedia se empleó un sistema de sonido Sony Ht-ct150, sistema de bocinas 5.1 Yamaha, sistema portátil de audio tipo maleta usb, audífonos inalámbricos Sennheiser Rs 170

con sistema Klear, y un sistema de teatro 5.1 HD-300 Klipsch, con los cuales se pudieron realizar las pruebas de funcionamiento del sistema, en las que se comprobó la funcionalidad del protocolo PurePath y el cumplimiento de las especificaciones del módulo CC8531 y CC2590EM. [2]

En el año 2013, Camilo Andrés Castro Méndez realizó un estudio acerca del “Desarrollo de un prototipo pre-industrial de comunicación para la transmisión inalámbrica de audio para instrumentos musicales” en la ciudad de Colombia. Su estudio se basó en el diseño y fabricación de nuevos dispositivos para la transmisión de audio digital entre un instrumento musical eléctrico como guitarra o bajo y el amplificador de audio asignada a cada uno de dichos instrumentos. El audio transmitido posee calidad de CD de audio comercial de 16 bits a 44.1kHz empleando la banda de uso público de 2.4GHz, características que se encuentran en el módulo CC8520 y CC2590 con tecnología del protocolo PurePath Wireless. Se destaca la capacidad del incremento de potencia de salida del amplificador y la utilización de un Low Noise Amplifier (LNA) para lograr filtrar el ruido del canal inalámbrico al emplear el módulo mencionado anteriormente. Como resultados se obtuvo un prototipo de dimensiones mayores a las deseadas por la poca experiencia en la manipulación y montaje de los componentes del sistema, sin embargo las pruebas se realizaron por medio de una cámara anecóica. Cabe destacar que los resultados de esta investigación no fueron los esperados por las fallas e inconvenientes que se tuvo en la manipulación de los componentes, no obstante se hace referencia a que es un tema que permite el desarrollo de nuevo productos y dispositivos. [6]

En la ciudad de Cuenca, en el año 2013 se realizó un estudio sobre el “Diseño y montaje de enlace inalámbrico para transmisión de datos utilizando tecnología Bluetooth” por Tatiana Verónica Suquilanda Villa y Marlon Antonio Idrovo Torres. Se desarrolló un convertidor electrónico multinivel, para ser empleado como compensador estático de potencia en instalaciones industriales trifásicas. El proyecto se distribuyó en las siguientes etapas: Potencia, Tarjeta de control, Tarjeta de sensores, y Tarjeta de drivers. Para el desarrollo del estudio se empleó como elementos

principales IGBTs y FPGA para lograr una alta velocidad de procesamiento. Primeramente el diseño se lo realizó con conexiones basadas en fibra óptica, sin embargo se optó por emplear tecnología bluetooth por la cantidad de variables a medir, con su protocolo UART para el envío de los datos. Como resultados se propone que es válido implementar en industrias con poca extensión, pues su alcance es de 15m, no obstante brinda confiabilidad en la transmisión de los datos en tiempo real. [7]

Guillermo Serrano Callergues y Juan José Pérez Martínez en el año 2015 realizaron un investigación acerca de un “Diseño e Implementación de un amplificador de audio en clase AB en puente de baja potencia” en la ciudad de Valencia, en el cual se buscó incorporar una configuración tipo H o puente para poder tener una mayor caída de voltaje en la carga sin tener variaciones en la alimentación, sin embargo se tuvieron en cuenta aspectos de pérdidas caloríficas para evitar daños en los componentes. Las cargas empleadas fueron en el rango de 2 a 16  $\Omega$ , mientras mayor sea menor distorsión produce. Finalmente, en las pruebas de funcionamiento del prototipo se pudo observar que la carga mostraba un comportamiento inductivo por lo cual se añadió un filtro Zobel para compensar las frecuencias, con lo cual se obtuvo resultados más semejantes a los esperados en los que se observó una disminución notoria del comportamiento inductivo. [8]

El “Diseño e implementación de un amplificador para audio clase D, monofónico, de 100W” fue realizado en la ciudad de Quito en 2015 por Gabriel David Chiriboga Abata. El estudio estuvo conformado por las siguientes etapas: Carga, Filtro, Modulación, Pre-Amplificador, y Fuente de voltaje. El amplificador fue diseñado con transistores Mosfet para frecuencias entre 20 y 20kHz, y con conmutación PWM por el voltaje unipolar empleado. Las etapas mencionadas anteriormente permitieron que para la medición de resultados se obtenga una comparación entre valores teóricos y prácticos tanto de frecuencia portadora, voltaje, corriente y potencia, valores con los que se pudo determinar que el diseño del amplificador tipo D poseía una mayor eficiencia en comparación a otro tipo de amplificadores. [9]

En el año 2016, se investigó acerca de un “Sistema inalámbrico para la transmisión de señales de audio con mínima latencia” en la ciudad de Santiago de Chile, en dicha investigación Matías Felipe Becerra Aravena empleó estándares IEEE 802.11 para la capa física además de acceso mediante TDMA para música en vivo. El sistema se estructuró en dos partes, la primera compuesta por el nodo transmisor de la señal de audio a la consola, y la segunda es la encargada de recibir la señal de audio con la mezcla correspondiente de la consola, limitado principalmente por la ubicación de los elementos debido a que estos deberían estar en el mismo ambiente. Para comprobación de los resultados se realizó una simulación empleando el software OMNeT++, en el cual se obtuvieron datos de intervalos de tiempo, latencia, tiempo de sincronización para 24 y 54 Mbps. [10]

### 1.1.2. Fundamentación teórica

#### Amplificador

Un amplificador es un circuito o elemento que permite transformar una señal de entrada, en otra con mayor potencia en su terminal de salida, teniendo en cuenta que la forma de dicha onda no se conserva en su totalidad en el ámbito de la práctica, y depende generalmente de la linealidad del amplificador. [1]

Entre los efectos no deseados en un amplificador se los puede observar en las figuras 1, 2, y 3 y se denominan de la siguiente forma:

- Distorsión no lineal o intermodulación

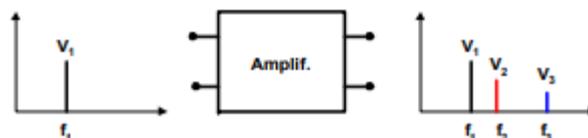


Figura 1. Distorsión no lineal. [2]

- Distorsión en frecuencia

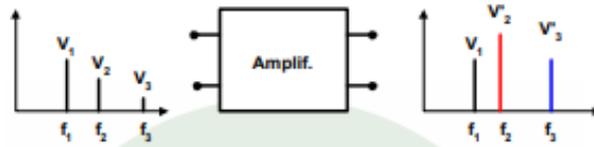


Figura 2. Distorsión en frecuencia. [2]

- Distorsión en fase

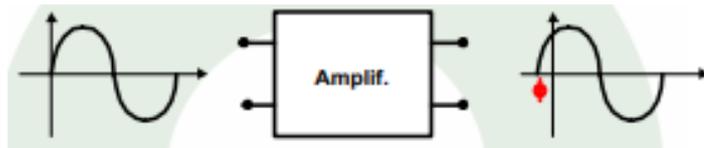


Figura 3. Distorsión en fase. [2]

### ○ Distorsiones de un amplificador

Entre las principales distorsiones que presenta un amplificador se tienen las siguientes:

Tabla 1. Principales distorsiones en amplificadores.

ERRORES	DESCRIPCIÓN
Etapas de entrada	Se produce cuando la señal de entrada tiene ruido, lo que conlleva a que al amplificar esta señal se pierda calidad
Linealidad en la etapa de amplificación de voltaje	Afecta directamente a la calidad del sonido, sin embargo se puede corregir mediante el empleo de realimentación del equipo.
Linealidad en la etapa de amplificación de corriente	Se presenta en amplificadores que tienen distorsión de cruce o paso por cero.
Distorsión por señales de corriente continua	Perjudica directamente al altavoz del equipo de sonido, ya que el parlante requiere disipar mucha potencia y las vibraciones sonoras no se producen de la manera esperada, no obstante se puede emplear condensadores en serie para disminuir este efecto.
Distorsión por carga inductiva	Es necesario tener en cuenta el comportamiento de la carga a altas frecuencias, por lo que se debe compensar los desfases que se pueden generar.

Elaborado por: Investigadora.

## ○ **Arquitectura de los Amplificadores**

En su gran mayoría los amplificadores de audio se componen de las tres etapas mencionadas a continuación [3]:

- **Etapas de pre-amplificación:** Es la etapa que se encarga de amplificar la señal de audio y de adaptarla y acoplarla a la etapa de potencia.
- **Etapas de potencia:** Se encarga de transferir la potencia tomada de la fuente de alimentación hacia la señal de audio modificando sus parámetros de amplitud y ganancia.

## ○ **Clasificación de los Amplificadores**

### a. Según el elemento activo [3]:

- Transistores unipolares: Emisor Común, Colector común, Base común.
- Transistores bipolares: FET o MOS.
- Circuitos integrados: Operacionales y específicos de audio, video e instrumentación.

### b. Según el tipo de señal [3]:

- De CC: Fuentes de alimentación o activación de actuadores.
- De señal
- Baja frecuencia: Amplificación de transductores para medida.
- Media frecuencia: Amplificación de voz o audio.
- Alta frecuencia: Amplificación de video.
- Señal de radiofrecuencia: Mayor a 20 kHz.

### c. Según la potencia [3]:

- |             |            |            |
|-------------|------------|------------|
| ● Clase A.  | ● Clase D. | ● Clase H. |
| ● Clase B.  | ● Clase E. | ● Clase I. |
| ● Clase AB. | ● Clase F. | ● Clase S. |
| ● Clase C.  | ● Clase G. |            |

d. Según las etapas de amplificación [3]:

- Mono-etapa.
- Multi-etapa.

A continuación se realizará un análisis de los amplificadores empleados en audio según su clase:

### **Clase A**

La característica principal de este tipo de amplificadores radica en que la polarización de sus transistores está ubicada en la mitad de su zona activa, lo que causa que exista una circulación de corriente y caída de tensión en los transistores en ausencia de señal, además en su etapa de potencia se consumen corrientes de valor elevado de forma continua independientemente de la existencia de señal de entrada. [4, 5]

Poseen un bajo rendimiento de alrededor del 20% al 25%, lo que conlleva a que la mayoría de la potencia sea disipada en forma de calor, haciendo que se pierda una gran cantidad de energía que ingresa al amplificador, e incrementando el peso y volumen del dispositivo, debido a que requiere una gran superficie de disipación, sin embargo esto hace que los transistores mantengan una temperatura constante lo que permite que el comportamiento del amplificador sea igual independientemente de la potencia que entrega a la carga. [4]

Es empleado en circuitos de audio y equipos domésticos de alta gama, debido a la calidad de audio que proporcionan.

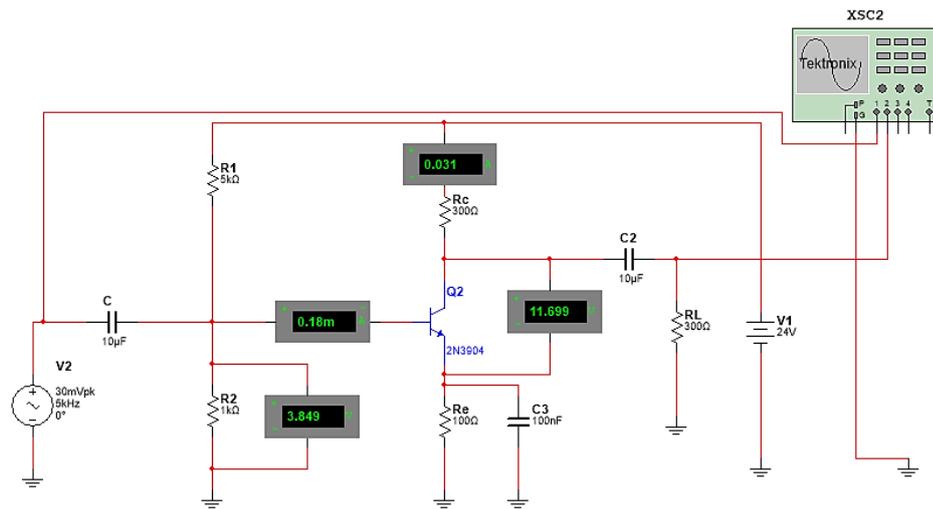
En la tabla 2 se mencionan las ventajas y desventajas de este tipo de amplificador:

**Tabla 2.** Ventajas y desventajas del amplificador clase A.

<b>VENTAJAS</b>	<b>DESVENTAJAS</b>
<ul style="list-style-type: none"><li>• Posee un comportamiento cuasi lineal.</li><li>• Tiene una distorsión menor.</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Su eficiencia es baja.</li><li>• Emplea una alta corriente.</li><li>• Genera un elevado valor de temperatura.</li><li>• Se requiere de un gran amplificador de esta clase para dar una potencia media.</li></ul>

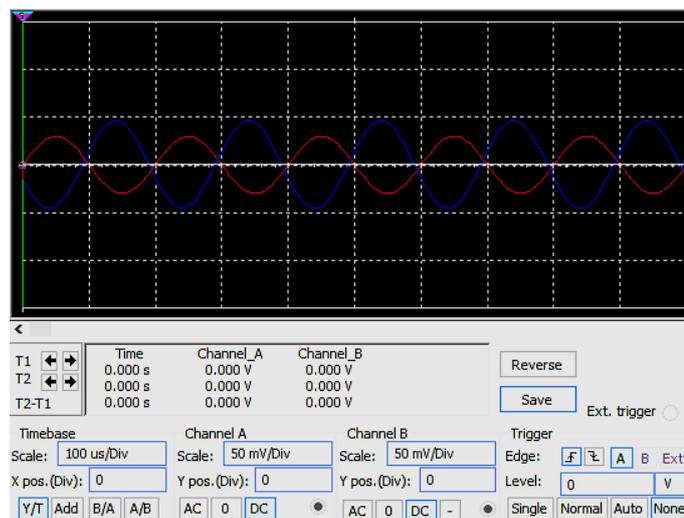
**Elaborado por:** Investigadora

En la figura 4 se muestra el circuito de un amplificador clase A, a partir del cual se generan las ondas de entrada y salida respectivamente mostradas en la figura 5, de acuerdo al circuito se puede observar la inversión de los ciclos de acuerdo a la amplificación con un transistor BJT, cabe destacar que la amplificación de la onda generada en la salida depende directamente de los elementos que se empleen para la configuración del transistor, y los parámetros de entrada que en este caso se los tomó de una fuente sinusoidal de 30mVp con una frecuencia de 5kHz, dichos valores se encuentran dentro de los rangos establecidos para audio.



**Figura 4.** Esquema típico de amplificador clase A.

**Elaborado por:** Investigadora.



**Figura 5.** Comportamiento de un amplificador clase A.

**Elaborado por:** Investigadora.

## Clase B

Los amplificadores de clase B se caracterizan por tener un valor de corriente nula cuando no existe señal de entrada en el circuito, por lo que el consumo es notablemente menor que en clase A. [4]

Cada uno de los transistores pertenecientes al circuito amplifica solamente en un semiciclo la señal de entrada, lo que hace que el punto de trabajo se encuentre en la zona de corte, de tal forma que el transistor pasa a la región activa solamente cuando pase el semiciclo adecuado. [4]

A pesar que posee un menor consumo la calidad disminuye por la forma de amplificación de la señal, sin embargo su eficiencia es aproximadamente del 75%. Es empleado en sistemas telefónicos, transmisores de seguridad portátiles y sistemas de alerta. [5]

Una de las configuraciones típicas de este tipo de amplificador es en push pull, empleando dos transistores para aumentar la eficiencia alrededor del 70%, sin embargo necesita tener en cuenta que requiere de una fuente simétrica, o en su defecto un transformador. [5]

En la tabla 3 se mencionan las ventajas y desventajas de este tipo de amplificador:

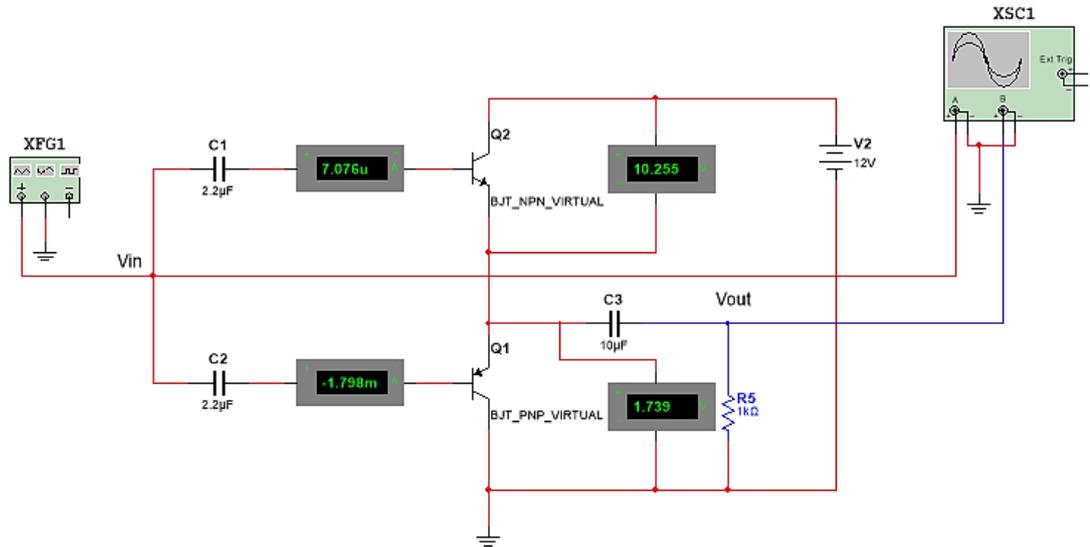
**Tabla 3.** Ventajas y desventajas del amplificador clase B.

<b>VENTAJAS</b>	<b>DESVENTAJAS</b>
<ul style="list-style-type: none"><li>• Tiene un bajo consumo en reposo.</li><li>• La corriente entregada por la fuente de alimentación es aprovechada al máximo.</li><li>• En estado de reposo la corriente es casi nula</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Produce armónicos.</li></ul>

**Elaborado por:** Investigadora

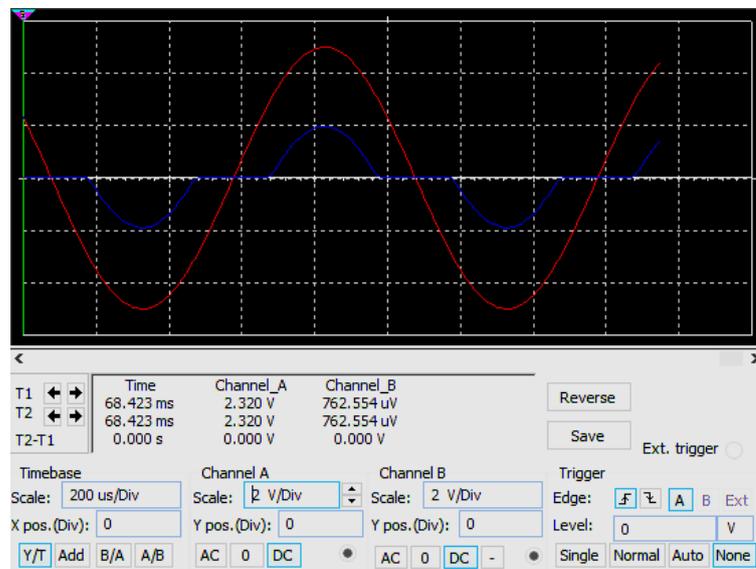
El circuito mostrado en la figura 6 es un amplificador de clase B tipo Push-Pull, el mismo que se encuentra conformado por dos transistores para mejorar el rendimiento y la calidad de la onda generada en la salida, evitando los recortes bruscos de los ciclos de la onda senoidal, en base a dicha figura se generaron las ondas de entrada y salida

respectivamente mostradas en la figura 7, en la cual se observa una pérdida de forma de la señal en el cruce por cero, no obstante es necesario tener en cuenta que esta salida generada con la configuración mencionada anteriormente es semejante a un amplificador tipo AB.



**Figura 6.** Esquema típico de amplificador clase B.

**Elaborado por:** Investigadora



**Figura 7.** Comportamiento de amplificación clase B.

**Elaborado por:** Investigadora

## Clase AB

Es considerado un amplificador clase con mejora en la polarización de los transistores evitando así la alta distorsión, sin embargo presenta un alto consumo energético, aproximadamente el doble de la potencia suministrada.

Este tipo de amplificadores posee un dominio en el mercado, ya que es altamente competitivo con los mejores amplificadores de clase A en cuanto a calidad de sonido, además que requiere de un menor consumo de corriente, y son de menor costo, y tamaño.

Su principal diferencia con los amplificadores tipo B, radica en que poseen un pequeño valor de corriente que fluye por el terminal positivo hasta el terminal negativo aun cuando no existe una señal de entrada, lo que genera el consumo, no obstante es menor al de clase A. Este valor de corriente permite disminuir las no linealidades asociadas con la distorsión del filtro. [6]

Su principal característica se basa en que con señales grandes, trabajan como amplificadores de clase B, pero con señales pequeñas se comportan como amplificadores de clase A. Es la clase comúnmente empleada en audio por el nivel de rendimiento que presentan de alrededor del 50%. [5]

En la tabla 4 se mencionan las ventajas y desventajas de este tipo de amplificador:

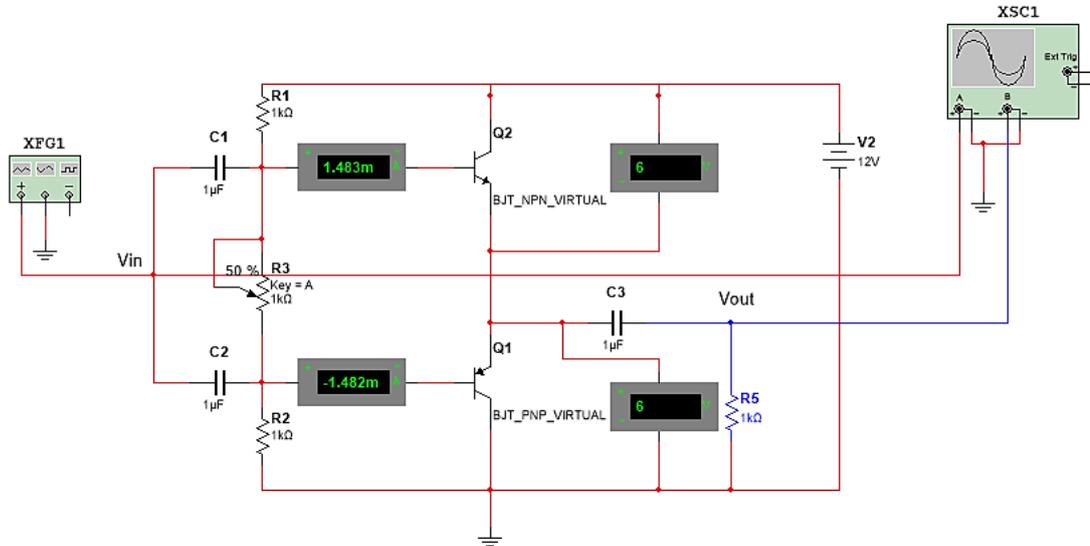
**Tabla 4.** Ventajas y desventajas del amplificador clase AB.

<b>VENTAJAS</b>	<b>DESVENTAJAS</b>
<ul style="list-style-type: none"><li>• Eficiencia razonablemente buena.</li><li>• Posee una salida de alta calidad.</li><li>• Baja distorsión.</li><li>• Alto nivel de linealidad.</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Presenta picos de distorsión si los transistores se polarizan inadecuadamente.</li><li>• Consumo energético mayor.</li></ul>

**Elaborado por:** Investigadora

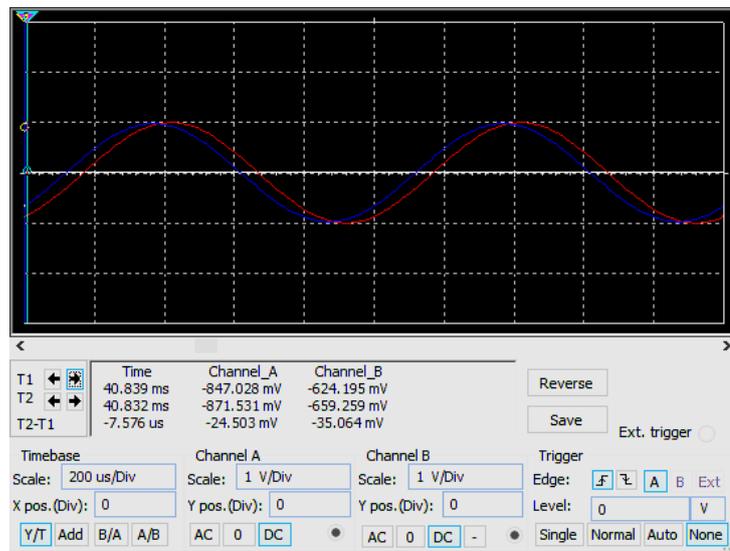
La figura 8 muestra un esquema típico de un amplificador de clase AB, el cual se destaca por mejorar la salida al obtener una onda sin mayores pérdidas de señal

conservando los ciclos tanto positivo como negativo por emplear un transistor PNP y un transistor NPN, las ondas de entrada y salida que genera este tipo de amplificador se lo puede observar en la figura 9, en la cual se muestra que se conserva la forma de onda a pesar de presentar un ligero desfase de onda.



**Figura 8.** Esquema típico de amplificador clase AB.

**Elaborado por:** Investigadora



**Figura 9.** Comportamiento de amplificación clase AB.

**Elaborado por:** Investigadora

## Clase D

Los amplificadores de clase D son también conocidos como amplificadores en conmutación, debido a que emplea un modo conmutado de los transistores para controlar la entrega de potencia. [4, 5]

Su principal característica es el alto nivel de eficiencia, ya que los transistores no operan en la región activa, sin embargo cuando el dispositivo está encendido, la corriente máxima fluye a través de ellos la caída de tensión que se presenta es de valor cero, y cuando el dispositivo está apagado, la corriente que fluye es nula pero se presenta el valor máximo de tensión, cabe destacar que en ambos casos la potencia disipada en los transistores es cero. [4]

La gran eficiencia que presenta es mayor al 90%, además el tamaño y peso del dispositivo es menor que en las clases mencionadas anteriormente, porque no se requieren un gran número de disipadores de calor por las pequeñas pérdidas de energía que se tiene. [4]

En la tabla 5 se mencionan las ventajas y desventajas de este tipo de amplificador:

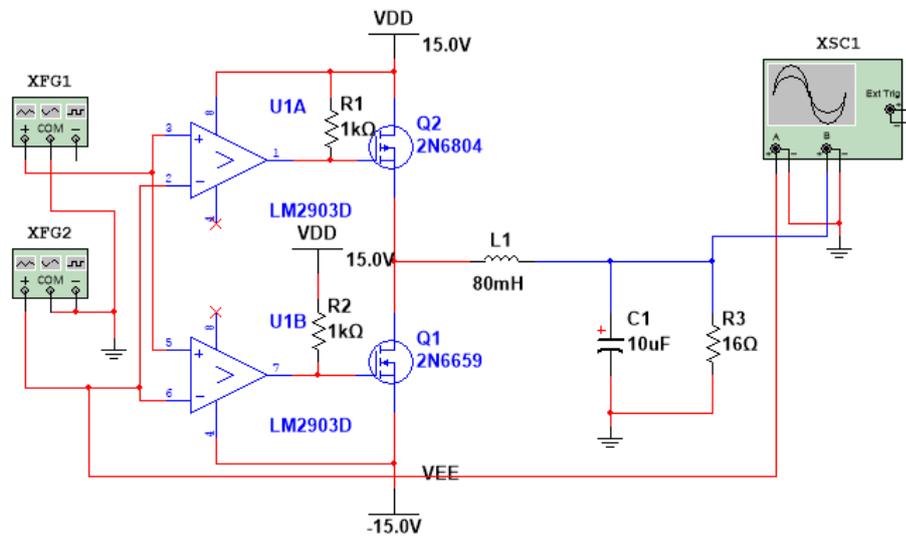
**Tabla 5.** Ventajas y desventajas del amplificador clase D.

<b>VENTAJAS</b>	<b>DESVENTAJAS</b>
<ul style="list-style-type: none"><li>• Reducción en tamaño y peso.</li><li>• Alta eficiencia mayor al 90%.</li><li>• Menor número de disipadores de calor.</li><li>• Menor consumo para conseguir las mismas potencias de sonido.</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Menor calidad de sonido.</li><li>• Mal funcionamiento en altas frecuencias.</li><li>• Requiere filtros LC externos, lo que incrementa el costo y se producen distorsiones en la señal por los efectos de la no linealidad.</li></ul>

**Elaborado por:** Investigadora

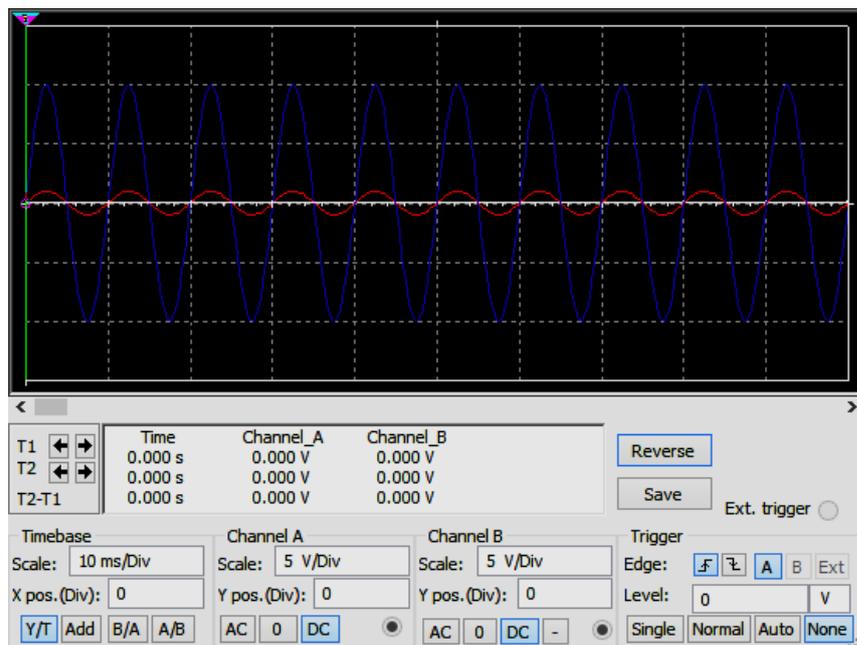
En la figura 10 se muestra un esquema típico de un amplificador clase D, el cual emplea dos generadores de señal a distintas frecuencias, una señal senoidal y una señal

triangular, las mismas que medio de un comparador permiten generar una señal PWM, además emplea dos transistores para mantener los dos ciclos de la señal generada a la salida como se observa en la figura 11, además de que por sus características se muestra que la onda de salida, es decir, la señal amplificada tiene una mayor amplitud con respecto a la señal de entrada.



**Figura 10.** Esquema típico de amplificador clase D.

**Elaborado por:** Investigadora



**Figura 11.** Comportamiento de amplificador clase D.

**Elaborado por:** Investigadora

## Clase H

Se apoya en la configuración B o AB y D de amplificadores, pero su objetivo principal es el aumento en la eficiencia de la clase B. [7, 8]

Su funcionamiento se basa en el ajuste de los niveles de alimentación a los requerimientos de potencia de salida, en lugar de conmutar entre dos niveles de voltaje, sin embargo la mejora no es muy elevada. Los transistores pertenecientes a la etapa de salida operan en la zona de saturación y en la región lineal de funcionamiento. [7, 8]

Por las características de este tipo de amplificador, su disipación de calor en la máxima potencia es menor que la clase B o AB. [7]

En la tabla 6 se mencionan las ventajas y desventajas de este tipo de amplificador:

**Tabla 6.** Ventajas y desventajas del amplificador clase H.

<b>VENTAJAS</b>	<b>DESVENTAJAS</b>
<ul style="list-style-type: none"><li>• El diseño térmico es más complejo.</li><li>• Mantiene la eficiencia en la mayoría de sus niveles de salida.</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Requiere un alto PSRR (Factor de Rechazo a Fuente de Alimentación).</li><li>• Diseño complejo de fuente.</li><li>• Se ve afectado por interferencias electromagnéticas emitidas por la fuente.</li></ul>

**Elaborado por:** Investigadora

El circuito mostrado en la figura 12 es un esquema típico para un amplificador de clase H, el cual basa su funcionamiento en dos etapas de amplificación con base en una configuración de clase B tipo Push-Pull, las ondas de entrada y salida se las puede observar en figura 13, en la cual se puede observar claramente que las dos poseen distintas frecuencias, las cuales se modifican con los parámetros de la fuente empleada, además requiere una retroalimentación para evitar el corte de ciclos, cabe recalcar que la señal PWM influye directamente en la onda de salida mostrada en la figura. Los valores empleados en la fuente generadora de la señal sinusoidal son de 500mV y 100Hz, los cuales están comprendidos dentro de los estándares de audio, para obtener resultados reales.

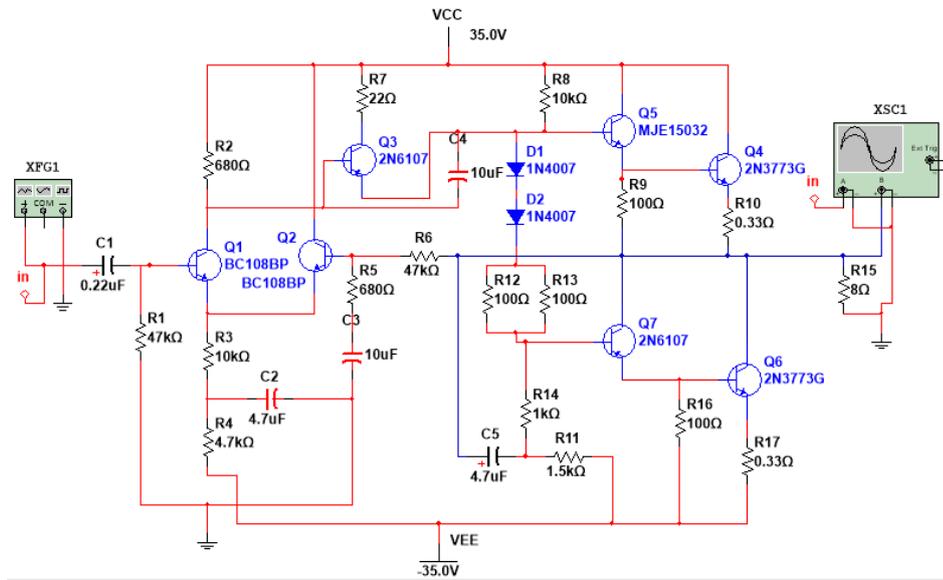


Figura 12. Esquema típico de amplificador clase H.

Elaborado por: Investigadora

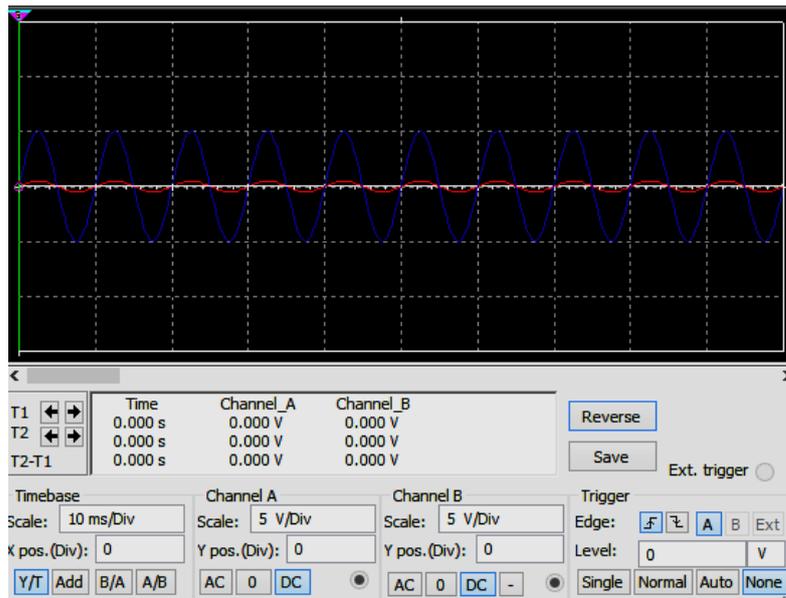


Figura 13. Generación de PWM en amplificador clase H.

Elaborado por: Investigadora

## **Comunicación Inalámbrica**

La comunicación inalámbrica se refiere a un sistema de comunicación eléctrico que no requiere la utilización de medios físicos para la interconexión de equipos empleados en el sistema, es decir, no se requiere de un canal físico para la propagación de información entre los dispositivos emisor y receptor. Este tipo de comunicación basa su funcionamiento en las ondas electromagnéticas transmitidas por medio del espacio libre a una velocidad comparable a la de la luz ( $3 \times 10^8$  m/s). [9]

Como una de sus principales ventajas se destaca el uso de distintas bandas de frecuencias dentro del espectro electromagnético para la transmisión de información. Una de las bandas que se usa frecuentemente en las comunicaciones en la tierra es la banda de frecuencias ultra altas o UHF que comprende el rango de 300 a 3000 MHz, ofrece versatilidad en cuanto a la compatibilidad de dispositivos con la conocida tecnología Wi-Fi, además de un alto desempeño en redes inalámbricas (WPAN), y presenta una mejor operación en ambientes con presencia de obstáculos. La principal característica para que esta banda sea aplicada se basa en que no requiere de una licencia especial para su uso, como es el caso para frecuencias entre 2400 a 2438,5 MHz en las que se incluyen tecnologías como Wi-Fi o Bluetooth. [9]

En la actualidad las comunicaciones inalámbricas presentan una utilización en diversos campos como redes de sensores inalámbricas, casas domóticas, fábricas e industrias automatizadas, medicina y telemedicina. [9]

## **Señal Digital**

Son variables de origen eléctrico, que poseen dos niveles diferenciados que se alternan en el tiempo para lograr una transmisión de información según un determinado código, cada uno de los niveles mencionados anteriormente se los representa con un 0 ó 1, V o F, bajo o alto, etc. [10, 11]

Por tener dos niveles de estados se consideran señales óptimas para representar, transmitir o almacenar información dada en forma binaria. [10]

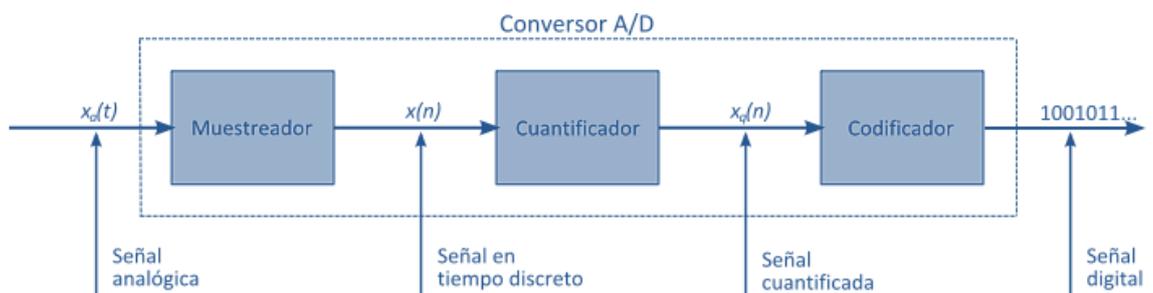
- **Transmisión Digital de Información y Modulación por Codificación de Pulsos (PCM)**

Debido a la atenuación y amplificación de ruido que presenta la transmisión análoga de señales, en la actualidad se emplean señales digitalizadas, debido que este tipo de señales permite eliminar las señales indeseadas y reconstruir a su estado original después de ser procesadas. [9]

La transmisión digital de información consiste en el envío de pulsos digitales entre dos puntos de un sistema de comunicaciones, para lo cual se emplean las siguientes técnicas de manipulación de señales [9]:

- Modulación por ancho de pulso (PWM)
- Modulación por posición de pulso (PPM)
- Modulación por amplitud de pulso (PAM)
- Modulación por codificación de pulso (PCM)

La modulación por codificación de pulso es la técnica más empleada para la transmisión digital de información y audio. Hace referencia a una forma de codificación de la onda, que se emplea para codificar una señal análoga en una señal digital, la exactitud de esta reconstrucción depende directamente del número de bits usados para la representación digital de esta, además PCM disminuye los problemas de ruido y distorsión para la transmisión de voz o audio. [9]



**Figura 14.** Digitalización de una señal análoga con PCM. [9]

La digitalización o conversión análoga-digital es tomar de forma periódica medidas del voltaje de una señal, aproximar sus valores a un determinado conjunto de niveles preestablecidos de voltaje y finalmente asignar a cada una de las muestras un número binario que la identifique [10, 12]. Este proceso se lo puede observar en la figura 14, y se lo describe a continuación:

- **Muestreo**

Consiste en tomar muestras de la amplitud de la señal durante un determinado intervalo de tiempo, para luego convertir dichas muestras en una serie de pulsos, de una amplitud determinada con una duración corta.

Para la realización de este proceso es necesario que la señal cumpla con dos características fundamentales, la primera es que la señal original esté acotada por un ancho de banda máximo y la segunda se refiere a que la velocidad o frecuencia de muestreo debe ser igual o superior al doble de la frecuencia máxima de la señal de entrada, estas dos características conforman el Teorema de muestreo o Teorema de Nyquist, enunciado en la ecuación 1 [9]:

$$f_m \geq 2f_s \quad (1)$$

Donde:

$f_m$ : Frecuencia de muestreo.

$f_s$ : Frecuencia máxima de la señal de entrada.

- **Cuantificación**

El proceso de cuantificación consiste en asignar un valor discreto de amplitudes dentro de un rango definido de valores continuos que pueden tomar las muestras. Este rango es conocido como intervalos de cuantificación, dentro de cada uno de estos intervalos se tienen zonas o niveles de cuantización, los cuales se determinan por el número de bits que se usan para representar las muestras de la señal, como se muestra en la ecuación 2 [9]:

$$2^n \tag{2}$$

Donde n es el número de bits utilizados.

- **Codificación**

La codificación es un proceso que consiste en establecer una representación de cada una de las muestras cuantificadas por medio de la asignación de un código binario. La exactitud que se requiera dependerá de los bits que se empleen en este proceso. [9]

### **Transmisión de Audio Digital**

La utilización de formatos de transmisión digital de audio permite reducir que las deficiencias del sistema análogo, pues presenta una alta inmunidad al ruido y emplea multiplexación para reducir el cableado, además permite detectar y corregir errores brindando la posibilidad de verificar la integridad de los datos recibidos. [13]

En la actualidad la mayoría de los dispositivos de audio emplean un formato digital, en los cuales se tiene una distribución de audio para evitar etapas de conversión análoga digital, evitando costos elevados y degradación de la calidad de la señal. [13]

En la tabla 7 se muestran conceptos que son necesario para comprender la transmisión de audio digital.

**Tabla 7.** Conceptos de Transmisión de audio.

<b>Tasa de muestreo</b>	También conocida como frecuencia de muestreo, permite definir un intervalo de tiempo en el que se tomará el valor de una señal análoga para generar el audio digital, teniendo en cuenta que el audio digital es una cadena de ceros que se genera a partir de un muestreo de la señal analógica.
<b>Resolución</b>	El bit de resolución es el número de bits que se emplea para almacenar cada una de las muestras que se toman de la señal análoga.
<b>Velocidad de transmisión</b>	También llamada bit de velocidad, permite definir la cantidad de bits o espacio físico que ocupa un segundo de duración de audio. En lo referente a audio mientras más calidad posea mayor será su bit de velocidad y el archivo será más pesado.
<b>CBR/VBR</b>	Es la Constante/ Variable de bit de velocidad. El CBR permite indicar si el audio fue codificado con una velocidad de bit constante y el VBR indica el rango máximo y mínimo de la velocidad de bit en función de la tasa de transferencia.
<b>CODEC</b>	Indica un Codificador/Decodificador, es conocido por ser un algoritmo que reduce el número de bytes que ocupa un archivo de audio.
<b>Límites de la Audición</b>	Se considera espectro audible al rango de frecuencias que el oído humano es capaz de escuchar o al que es sensible. Dicho rango no es el mismo en todas las personas, y depende fundamentalmente de la edad, sin embargo está normalizado entre 20 Hz a 20 kHz.
<b>Transporte de audio</b>	Los métodos empleados para la transmisión de audio son diversos, empleando tanto redes cableadas como inalámbricas, y la elección de un método adecuado requiere de un análisis de parámetros como ancho de banda, inmunidad a errores, capacidad, calidad y latencia.

**Elaborado por:** Investigadora

### **Transmisión Inalámbrica**

Este tipo de transmisión se lleva a cabo con el uso de antenas, las mismas que se encargan de radiar o captar energía electromagnética. [13]

Las configuraciones disponibles dentro de este tipo de transmisión se detallan a continuación [13]:

- **Transmisión Direccional:** Toda la energía se concentra en un haz emitido en una determinada dirección.



**Figura 15.** Transmisión direccional. [13]

- **Transmisión Omnidireccional:** La energía de la transmisión se dispersa en múltiples direcciones.



**Figura 16.** Transmisión Omnidireccional. [13]

### ○ Tecnologías inalámbricas

La selección de una determinada tecnología inalámbrica requiere comprender la capacidad y requerimientos dentro de una aplicación, además del costo de la instalación, así como también la flexibilidad e inclusión de nuevas aplicaciones, y principalmente el ancho de banda disponible. [1]

Entre los tipos de tecnologías inalámbricas se tiene:

**Tabla 8.** Conceptos de Transmisión de audio. [14, 15]

<b>RF</b>	Son señales de generación sencilla y se encuentran en el rango de los 3 kHz a 300 GHz. Se usan por su posibilidad de penetrar a través de objetos y viajar largas distancias. Depende de factores como: longitud de onda, potencia del transmisor, calidad del receptor, tipo y tamaño de la antena. Se utilizan para televisión, radio, teléfonos móviles.
<b>Infrarrojo</b>	Son radiaciones no visibles para el ojo humano. Se generan a través de un LED, son de corto alcance y no son inmunes a los obstáculos. Se los emplea en controles remoto de televisores, intercambio de datos, etc.
<b>Microondas</b>	Son ondas en el rango de 300 MHz a 300 GHz, son utilizadas para la transmisión de datos y comunicaciones a larga distancia por su bajo costo. Además se las emplea en hornos microondas, transmisión de programas de televisión, radiodifusión.
<b>Ondas de luz</b>	Su longitud de onda varía entre 430 a 750 THz, se las emplea como señales ópticas unidireccionales no guiadas.
<b>Wi-Fi</b>	Es un tipo de comunicación de baja potencia que se emplea en dispositivos como smartphones, laptops, etc. Requiere de un enrutador para la conexión. Posee una cobertura de 300 m con una velocidad máxima de 54 Mbps.
<b>WiMax</b>	Es un tipo de tecnología similar a Wi-Fi, pero se destaca por tener un alcance de 30km y velocidades máximas de 124 Mbps. Se considera una tecnología óptima para conexiones a internet con alta velocidad.
<b>Li-Fi</b>	Emplea luz en lugar de ondas de radio para la transmisión de información, a través de un LED. Su velocidad puede llegar a ser superior a Wi-Fi hasta en 100 veces.
<b>Bluetooth</b>	Permite la interconexión de dispositivos a corta distancia. Se lo puede encontrar en smartphones, auriculares, manos libres, mouse, teclados, laptops.
<b>ZigBee</b>	Es un estándar diseñado para redes de control y sensores inalámbricos con bajo consumo y costo. Se lo puede emplear en diversos ambientes por su fácil implementación.
<b>PurePath Wireless</b>	Es una solución de bajo consumo para la transmisión inalámbrica de audio digital de alta calidad. Incluye un protocolo para controlar dispositivos de audio, además evita la interferencia con otros sistemas de radio de 2.4GHz o ser interferido por ellos.

## **PurePath Wireless**

Los productos con tecnología PurePath Wireless de Texas Instrument, se caracterizan por su robustez y alta calidad en lo referente a streaming de audio en la banda de 2.4GHz, brindando un enlace inalámbrico sólido de audio sin compresión de 16 bits a 44.1 o 48 kHz sin errores o pérdidas. Emplea canales de RF para la transmisión inalámbrica lo que permite que la interferencia sea mínima con otros dispositivos que trabajan en la banda ISM de 2.4 GHz. [16]

Dispone de una interfaz HID (Dispositivo de interfaz humana) que permite la configuración de la tarjeta, por lo que no requiere el desarrollo de software. Admite la transmisión de hasta 4 canales desde un solo maestro. Posee una fija y baja latencia que es configurable, además tiene un reloj que asegura la sincronización perfecta de los altavoces o dispositivos asignados a la reproducción del audio. Garantiza flexibilidad, rentabilidad en problemas de audio inalámbrico. [16]

### ○ **Características**

Entre las características de PurePath Wireless se tienen [15]:

- Audio sin compresión.
- Excelente robustez.
- Corrección de errores hacia adelante (FEC).
- Incorpora salto de frecuencia adaptativo.
- Compresión de audio opcional de alta calidad.
- Conexión y control ininterrumpidos de codecs de audio externos
- Funciones de HID para control de potencia y volumen, emparejamiento y selección de canales.
- Velocidad de datos por aire de 5 o 2 Mbps.
- Potencia programable de hasta +3.5 dBm.
- -83 o -86 dBm de sensibilidad.

- Admite anchos de palabra de 16 y 24 bits
- Frecuencias de muestreo de 32, 40.275, 44.1 y kHz.
- Permite streaming multicanal.
- Coexistencia con Bluetooth, WLAN y otros dispositivos que trabajen a 2.4 GHz.

○ **Estándares**

El protocolo PurePath Wireless cumple con los siguientes estándares:

**Tabla 9.** Estándares de PurePath Wireless.

<b>ESTÁNDAR</b>	<b>REGULACIÓN</b>
ETSI EN 300 328 (Europa)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sistemas de transmisión de banda ancha.</li> <li>• Equipos de transmisión de datos que operan en la banda de 2.4 GHz y utilizan técnicas de modulación de banda ancha.</li> </ul>
ETSI EN 300 440 clase 2 (Europa)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Compatibilidad electromagnética y de espectro de radioeléctrico.</li> <li>• Dispositivos de corto alcance.</li> <li>• Equipos de radio que operan en el rango de 1 GHz a 40 GHz.</li> </ul>
FCC CFR47 Parte 15 (US)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Dispositivos de radiofrecuencia.</li> </ul>
ARIB STD-T66 (Japón)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sistemas de comunicación de datos de baja potencia de segunda generación.</li> <li>• Sistemas de LAN inalámbrica.</li> </ul>

**Elaborado por:** Investigadora

○ **Áreas de aplicación**

Entre las principales aplicaciones del protocolo se tiene [16]:

- Auriculares inalámbricos.
- Sistemas de audio inalámbricos.
- Sistemas 2.0
- Sistemas 2.1
- Sistemas 3.0
- Sistemas 3.1

- Sistemas de teatro en casa inalámbricos.

## **Sonido**

Desde el punto de vista físico, se puede definir al sonido como una vibración que se propaga a través de un medio elástico sólido, líquido o gaseoso, sin embargo al hablar de sonido audible por el oído humano el sonido es una sensación percibida por medio del oído y es producido por la propagación de vibraciones en forma de ondas caracterizadas por medio en el que viajan. [17]

### ○ **Evolución de la grabación y reproducción del sonido**

La historia del sonido y su avance dentro de la tecnología comprende cinco etapas establecidas las cuales se mencionarán a continuación [18, 19, 20]:

#### **Primera etapa**

Conocida como la etapa de Reproducción Mecánica del Sonido, se destacaron los carillones automáticos mejor conocidos como relojes de campanarios. Además se tiene las cajas de música que funcionaban a través de cilindros de púas que giraban sobre un peine metálico que permiten generar vibraciones y producir el sonido.

El piano mecánico o pianola, sustituyó las púas por rollos de papel con agujeros que con la presión del aire emite sonido a través de un pedal.

#### **Segunda etapa**

Llamada la etapa de Grabación y Reproducción Mecánica del Sonido, surgió a finales del siglo XIX, empezó con los primeros experimentos y pruebas para la grabación de sonido y la reproducción del mismo. La grabación de las ondas sonoras se la realizó con el impulso que generaban las mismas y su reproducción con un proceso inverso.

Dentro de esta etapa se destaca el fonógrafo creado por Thomas Alva Edison en 1878, conocida como la máquina parlante, su mecanismo de funcionamiento se basaba en un cilindro cubierto por estaño y girar dicho cilindro mediante una manivela.

El gramófono surgió en 1896, patentado por Berliner. Se basó en la idea del fonógrafo, sustituyendo el cilindro por discos lisos que al girar la aguja reproduce el sonido por los surcos en espiral de los discos.

### **Tercera etapa**

Esta etapa surgió en el periodo comprendido entre 1920 y 1925, ya que se introdujo la electricidad en la reproducción y grabación de sonidos, dejando obsoleto el registro mecánico. Se conoce a esta etapa como Grabación y Reproducción Eléctrica del sonido, en el que se incluyen micrófonos, amplificadores y altavoces.

El tocadiscos fue uno de los dispositivos que se destacaron en esta etapa, el cual consistía en la reproducción y grabación electromagnética que surgió como la electrificación del gramófono, el cual empleaba discos de vinilo con grabaciones en las dos caras conocidos como single y long play, con surcos para la reproducción del sonido. El magnetófono tuvo su desarrollo a la par que el tocadiscos, su diferencia fue el empleo de cintas magnéticas con impresiones de las señales eléctricas de las ondas sonoras, brindó una mejor calidad de registro y un mayor tiempo de reproducción.

En 1960 se fabricó un nuevo formato de la cinta magnética conocida como casete, el cual se convirtió en un medio ideal para la reproducción de música, dejando al magnetófono para uso netamente profesional. En el año de 1979 se diseñó un reproductor de casete con menor tamaño y portátil conocido como walkman, el cual utilizaba auriculares para la reproducción de sonido.

La grabación estereofónica surgió en 1957, el cual consistió en la separación del sonido en dos o más canales para conseguir un sonido con direccionalidad y espacio. En 1975 surgió el sistema Dolby que permitió reducir el ruido de fondo.

### **Cuarta etapa**

Es conocida como la propia etapa de Grabación y Reproducción Digital del Sonido, surgió en 1970 y sustituyó a los sistemas analógicos para llegar los sistemas de reproducción de audio de la actualidad.

El sonido digital se consiguió a través de conversores análogo – digital, tomando en cuenta la frecuencia de muestreo y los valores binarios que puede tomar la señal de onda sonora.

Como principal soporte de grabación se creó el CD, el cual fue diseñado en policarbonato y permitía la grabación en una sola cara con puntos microscópicos, que para su posterior reproducción se empleó un rayo láser infrarrojo, se destacó por proporcionar calidad sin ruido de fondo y sin desgaste.

### **Quinta etapa**

La evolución del audio vino directamente con la necesidad de brindar una mejor calidad de audio en las salas cinematográficas, y poder llevar esta calidad hacía los hogares.

En el año 1974 se incorporó la tecnología Sensurround, la cual permitía incrementar los sonidos graves, en 1977 se estrenó y popularizó el sonido Dolby Stereo que marcó un pasó en la calidad de sonido, pues permitió añadir cuatro canales de sonido: central, izquierdo, derecho y efectos traseros.

A continuación, se logró ofrecer un sonido envolvente conocido como sonido 5.1 el cual fue de la mano con los sistemas CDS (Sonido Digital Cinematográfico), se caracterizaba principalmente por tener un menor nivel de ruido en las pistas de audio.

En 1991 llegó la tecnología Dolby Digital con sonido 5.1, el mismo que incorporaba sonido análogo, con opción de recuperación de la información digital. En 1993 las tecnologías en auge fueron DTS y SDDS (Sonido Digital Dinámico de Sony) que empleaban CD-ROM para la reproducción de los sonidos.

En 1999 se introdujo la tecnología digital Surround EX, la cual adicionó un canal posterior al sistema 5.1 para añadir una mejor percepción del espacio sonoro.

En el año 2010 la tecnología dolby Surround 7.1 se introdujo a la industria, dicha tecnología se caracterizaba por incorporar un sistema 5.1 con 2 canales independientes.

En cuanto a las salas de cine en la actualidad se emplea la tecnología Dolby Atmos, la cual se caracteriza por permitir tener hasta 64 canales independientes para brindar un realismo en cuanto al espacio sonoro de películas.

Al referirse a la calidad de sonido en estudios de grabación en la actualidad, todo se rige directamente a los monitores empleados para la reproducción del mismo, por lo que es necesario tener en cuenta las alteraciones que se producen cuando reproducen una canción que se conozca muy bien, además de costo y gama a la que pertenecen.

Al tener en cuenta la reproducción de audio en vivo es necesario saber que los altavoces son la clave en la calidad de audio, por lo que se recomienda evaluar y comparar opciones teniendo en cuenta parámetros como: potencia nominal, tamaño, portabilidad, y confiabilidad.

Entre las empresas reconocidas en la fabricación de equipos de audio en el mercado se tienen:

- Bose.
- Yamaha.
- QSC.
- Sennheiser.
- JBL.
- M-Audio.
- Sony.
- Electro-Voice.
- Mackie.
- Behringer.

○ **Velocidad del sonido**

Los factores que afectan directamente la propagación del sonido son la presión, temperatura y humedad. La velocidad a la que se propaga el sonido viene dada por la ecuación 4:

$$V = \sqrt{\frac{1.4 P}{D}} \quad (3)$$

Donde:

*P*: Presión.

*D*: Densidad

Para tener en cuenta el valor de cociente entre la presión y la densidad es necesario tener en cuenta la ley de Boyle, en la que se menciona que los volúmenes son inversamente proporcionales a la presiones de los gases.

El efecto de la temperatura en la velocidad del sonido radica en la oscilación de las moléculas de los gases, por lo que a mayor temperatura mayor velocidad de propagación, como se puede observar en la tabla 10, en la que se considera una humedad relativa del 50%.

**Tabla 10.** Velocidad del sonido de acuerdo a la temperatura.

°C	VELOCIDAD DEL SONIDO (m/s)
-20	319
-10	326
0	332
10	338
20	344
40	355

**Elaborado por:** Investigadora.

○ **Tono**

Es la característica del sonido que permite distinguir sonidos tanto graves como agudos, viene determinado directamente por la frecuencia, sin embargo puede cambiar de acuerdo a la presión [17].

Para lograr diferenciar los sonidos el espectro audible se divide en octavas, las cuales son intervalos entre dos sonidos con relación de frecuencias 1:2.

Las octavas se dividen como se muestra en la tabla 11:

**Tabla 11.** Octavas.

<b>OCTAVA</b>	<b>FRECUENCIAS (Hz)</b>
Primera	16 – 32
Segunda	32 – 64
Tercera	64 – 125
Cuarta	125 – 250
Quinta	250 – 500
Sexta	500 – 1000
Séptima	1000 – 2000
Octava	2000 – 4000
Novena	4000 – 8000
Décima	8000 -16000
Decimoprimera	16000 – 32000

**Elaborado por:** Investigadora

El espectro audible se lo subdivide de la siguiente forma:

**Tabla 12.** Espectro audible. [17]

<b>TONOS</b>	<b>FRECUENCIAS</b>	<b>OCTAVAS</b>
Graves	20 – 256 Hz	4 primeras
Medios	256 Hz – 2 kHz	Quinta, sexta y séptima
Agudos	2 - 20 kHz	Tres últimas

**Elaborado por:** Investigadora

- **Timbre**

Es la característica que posee el sonido para distinguir los sonidos con la misma intensidad y frecuencia emitidos en focos distintos. Se debe a que generalmente un sonido no es puro y depende principalmente del espectro de frecuencias que lo acompaña. [17]

- **Armónicos**

Se consideran armónicos de una señal a frecuencias que acompañan a la señal con la frecuencia principal, y cambian las características acústicas como color y tesitura de los sonidos en general. [17]

Pueden ser frecuencias deseadas o no y se presentan generalmente como distorsiones, sin embargo en algunos casos no se las considera pues se atenúan rápidamente. [17]

- **Intensidad**

Viene dado por la presión sonora o la fuerza que posee un sonido, y se puede subdividir en intensidad fuerte o débil. [17]

- **Duración**

Se lo considera como el tiempo que permanece un sonido en oscilación, y depende directamente de la intensidad y del tono. [17]

○ **Ruido en Audio**

En la reproducción de audio es necesario tener en cuenta dos ruidos principalmente que son [21]:

- **Ruido Blanco:** Se produce cuando todas las frecuencias se muestran en la misma proporción, generando una densidad espectral constante.
- **Ruido Rosa:** Se la emplea como señal de prueba en ensayos acústicos y electroacústicas, debido a que su densidad espectral disminuye de acuerdo a la frecuencia, lo que genera que la energía es la misma en cada una de las octavas.

○ **Clasificación del audio**

**Tabla 13.** Clasificación del sonido.

<b>Monofónico</b>	El envío de la señal se lo realiza tanto a la izquierda como a la derecha sin diferencia
<b>Estereofónico</b>	Envía señales independientes y diferencias a la derecha e izquierda, creando un efecto de ambiente acústico en el cerebro, pues localiza las fuentes sonoras en el oído.

**Elaborado por:** Investigadora.

○ **Nivel de Presión Sonora (SPL)**

La presión sonora puede ser definida como la diferencia existente en la presión instantánea del sonido y la presión atmosférica, es producida por la propagación de sonido. El rango de intensidades que puede detectar el oído humano va desde 0 dB SPL a 120 dB SPL, y viene determinado por el umbral de audición y el umbral de dolor [17]. El SPL se lo puede calcular con la ecuación 4:

$$SPL = 10 \log \frac{I}{I_0} [dB] \quad (4)$$

Donde:

$I$ : Intensidad de presión sonora [ $W/m^2$ ]

$I_0$ : Nivel de referencia [ $10^{-12} W/m^2$ ]

○ **Instrumentos de medición**

Entre los instrumentos de medición empleados en la reproducción y grabación de sonido se tienen [22]:

**Tabla 14.** Instrumento de medición.

<b>INSTRUMENTO</b>	<b>DESCRIPCIÓN</b>
<b>Sonómetro</b>	Permite medir SPL, sin embargo se considera que mide el nivel de ruido existente en un lugar y momento determinado.
<b>Micrófonos de medición</b>	Son dispositivos diseñados para obtener una respuesta plana, por lo que poseen un elevado costo.
<b>Calibrador</b>	Son dispositivos que emiten tonos de 1 kHz a 94 dB que sirven para ser la referencia de calibración de sonómetros.

**Elaborado por:** Investigadora.

○ **Sistemas de audio digital**

Entre los sistemas de audio digital se puede mencionar:

**Tabla 15.** Sistemas de audio digital. [23]

<b>Parámetro</b>	<b>CD</b>	<b>HDCD</b>	<b>SACD</b>	<b>DVD-AUDIO</b>
<b>Codificación</b>	PCM	PCM	PCM	PCM
<b>Cuantificación</b>	16 bits	16 bits	1 bit	12, 16, 20 ó 24 bits
<b>Capacidad</b>	650 Mb	650 Mb	1.9, 2.6 ó 3.9 Gb	4.7, 8.5 ó 17 Gb
<b>Canales</b>	2	2	Hasta 6	Hasta 6
<b>Respuesta en frecuencia</b>	5 - 20 kHz	5 - 22 kHz	0 - 100 kHz	0 - 96 kHz
<b>Dinámica</b>	96 dB	120 dB	120 dB	144 dB
<b>Frecuencia de muestreo</b>	44.1 kHz	44.1 kHz	2882,4 kHz	44.1, 88.2, 176.4, 48, 96, 192 kHz
<b>Velocidad de transferencia de datos</b>	1.4 Mbps	1.4 Mbps	2.8 Mbps	Hasta 9.6 Mbps

### **Filtros de Audio**

Entre los filtros aplicados habitualmente en audio se tiene [24]:

- **Pasa alto**

Los filtros pasa alto aplicados en audio poseen las siguientes características:

**Tabla 16.** Filtro pasa alto en audio.

<b>Frecuencia de corte</b>	3 dB (20 – 40 Hz)
<b>Orden</b>	Segundo o tercero
<b>Pendientes</b>	6, 12, 18 o 24 dB/oct
<b>Aplicación</b>	Atenuación de señales de frecuencias bajas que tengan ruido y distorsión.

**Elaborado por:** Investigadora

- **Pasa bajo**

Los filtros pasa bajo aplicados en audio poseen las siguientes características:

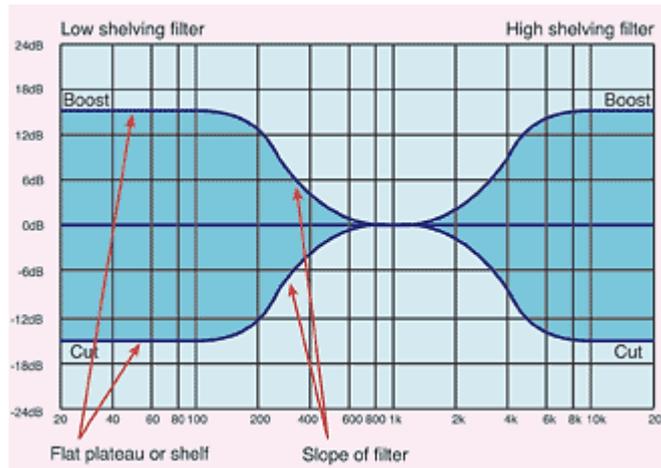
**Tabla 17.** Filtro Pasa bajo en audio.

<b>Frecuencia de corte</b>	3 dB (15 – 20 kHz)
<b>Orden</b>	Hasta sexto
<b>Pendientes</b>	6, 12, 18, 24, 48, 100 dB/oct
<b>Aplicación</b>	Atenuación de señales de frecuencias altas que tengan ruido y distorsión.

**Elaborado por:** Investigadora

- **Shelving**

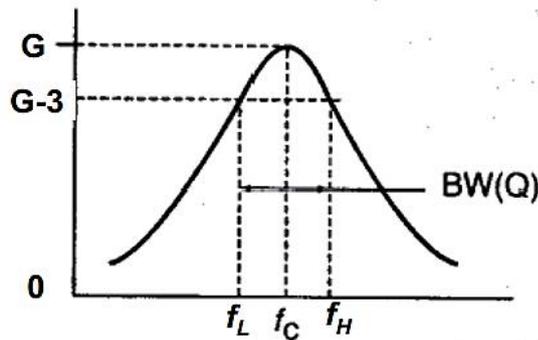
Son filtros de tipo control de tonos, que permiten el paso de ciertas frecuencias y la atenuación de otras sin anularlas, por lo que poseen dos bandas de paso con distinta atenuación que no aumenta a partir de la frecuencia de corte del filtro. Se los aplica en el realce de graves o agudos [24]. El comportamiento de este filtro se los muestra en la figura 17:



**Figura 17.** Filtro Shelving. [24]

○ **Peak y Bell**

Son filtros de tipo resonante, se caracterizan por no afectar a la señal lejos de su banda de paso. Son empleados en ecualizadores. En la figura 18 se puede observar la forma de onda que posee en relación de su frecuencia y ganancia. [24]



**Figura 18.** Filtro Peak y Bell. [24]

○ **Rechaza banda**

Son filtros que se caracterizan por atenuar una determinada banda de frecuencias generalmente la frecuencias de red como 50 o 60 Hz, o frecuencias de resonancia para evitar que se produzcan resonancias. [24]

## ○ **Aplicaciones de filtros de sonido**

Entre las aplicaciones de los filtros empleados habitualmente en sonido se tiene [24]:

- Compensación en la respuesta de frecuencia.
- Mezclas contrastadas con separación de las distintas frecuencias de cada uno de los instrumentos.
- Agregar efectos en instrumentos.
- Corrección de ruido en altas frecuencias en cintas magnéticas.

## **1.2.Objetivos**

### **1.2.1. Objetivo General**

Implementar un sistema de amplificación HI-RES con transmisión de audio inalámbrica empleando el protocolo PurePath Wireless

### **1.2.2. Objetivos Específicos**

- Determinar los componentes del sistema de amplificación HI-RES.
- Analizar el protocolo PurePath Wireless en la transmisión inalámbrica de audio.
- Diseñar el sistema de amplificación de audio empleando la tecnología HI-RES.
- Determinar los parámetros de transmisión y recepción del sistema de amplificación HI-RES.

### **1.2.3. Descripción de los objetivos**

El objetivo general del presente proyecto de titulación se enfocó en la implementación de un sistema de amplificación de alta resolución empleando transmisión de audio

inalámbrica por medio del protocolo PurePath Wireless, perteneciente a Texas Instruments, el cual fue desarrollado por la mencionada empresa para emplearlo específicamente en sistemas de audio.

Para el cumplimiento de este objetivo se realizaron las actividades mencionadas a continuación:

- Establecer los componentes del sistema de amplificación a implementar.
- Identificar los componentes y arquitectura de los sistemas de amplificación HI-RES.
- Definir la clase del amplificador de audio del sistema.
- Determinar las características de operación del protocolo PurePath Wireless.
- Dimensionar la potencia del sistema de amplificación de acuerdo a los valores de potencia del woofer y driver.
- Diseñar el sistema de amplificación de acuerdo a la arquitectura seleccionada para cumplir con el requisito de alta calidad de audio.

Determinar los componentes del sistema de amplificación HI-RES permitió tener un esquema general acerca del funcionamiento que se buscó que posea el sistema de amplificación de audio.

Las siguientes actividades permitieron la consecución del objetivo:

- Establecer un esquema general de los componentes físicos a emplear.
- Definir la arquitectura del sistema de amplificación HI-RES.
- Determinar la arquitectura de la comunicación inalámbrica de los dispositivos con tecnología PurePath Wireless.
- Diseñar el módulo a implementar en las cajas amplificadas seleccionadas.

Realizar un análisis del protocolo PurePath Wireless en la transmisión inalámbrica de audio, permitió tener una visión completa acerca de las fortalezas y debilidades del mismo frente a otras tecnologías inalámbricas disponibles en la actualidad.

El cumplimiento de las siguientes actividades permitió desarrollar de forma adecuada el objetivo mencionado:

- Indagar protocolos empleados en transmisión inalámbrica.
- Comparar parámetros técnicos de cada una de las tecnologías inalámbricas empleadas en la transmisión de audio.
- Establecer una idea concisa en lo referente al funcionamiento de la tecnología PurePath Wireless.
- Determinar los lineamiento necesario para emparejar los dispositivos a través de los ID's de cada tarjeta.
- Generar las imágenes firmware para cada uno de los dispositivos con tecnología PurePath Wireless necesarios.

El diseño del sistema de amplificación de alta calidad o HI-RES de audio se consideró como objetivo del presente proyecto, ya que es el que permitió conservar la calidad de audio transmitido por medio de las placas con tecnología PurePath Wireless.

Las actividades mencionadas a continuación permitieron la ejecución del objetivo:

- Definir las etapas necesarias para el correcto desempeño del amplificador de audio.
- Dimensionar los componentes electrónicos a utilizarse en cada una de las placas, teniendo en cuenta parámetros como voltaje y corriente.
- Proponer un diseño adecuado que cumpla con los parámetros de la tecnología requerida para el sistema de audio.
- Implementar el diseño propuesto y comprobar la funcionalidad del mismo.
- Corregir errores de acuerdo al resultado obtenido en la implementación del amplificador.

Otro de los objetivos a cumplir en el desarrollo del proyecto fue la toma de muestras de los parámetros de transmisión y recepción del sistema de amplificación HI-RES, las cuales permitieron conocer la existencia de desfases o distorsiones en la señal de audio.

Para la consecución del objetivo se desarrollaron las siguientes actividades:

- Indagar acerca de mediciones de audio en amplificadores de gama profesional.
- Determinar el tipo de ruido empleado para las mediciones de amplificadores en sistemas de audio profesional.
- Establecer los puntos de medición en los cuales es necesaria la colocación de sondas de osciloscopio.
- Captar formas de onda generadas en base al ruido empleado para comprobar parámetros de transmisión y recepción de sistema de amplificación.

## CAPÍTULO II

### METODOLOGÍA

#### 2.1. Materiales

##### 2.1.1. Selección de la tecnología inalámbrica a emplear

A continuación se analizaron los aspectos técnicos más relevantes en lo referente a las tecnologías inalámbricas que se consideraron emplear para el desarrollo del presente proyecto de investigación

**Tabla 18.** Tecnología inalámbrica a emplear

<b>Parámetros</b>	<b>ZigBee</b>	<b>Bluetooth</b>	<b>Wi-Fi</b>	<b>PurePath Wireless</b>
<b>Banda de operación</b>	2.4 GHz	2.4 GHz	2.4 GHz	2.4 GHz
<b>Velocidad de transmisión</b>	250 kbps	2 Mbps	54 Mbps	2 ó 5 Mbps
<b>Rango de cobertura</b>	10 -75 m.	10 m.	< 100 m.	< 50 m.
<b>Topología</b>	Malla	Picored	Malla, estrella	Estrella
<b>Consumo de potencia</b>	30 mA.	40 mA.	400 mA.	25 - 29 mA.

**Elaborado por:** Investigadora

Con los parámetros tomados en cuenta en la tabla 18, se determinó que la tecnología adecuada para el desarrollo del presente proyecto de investigación es PurePath

Wireless de Texas Instruments, ya que cumple con los requerimientos tanto de tasa de transmisión, como topología, y esencialmente permite la transmisión de audio de calidad sin la intervención de cables a distancias empleadas en lo referente a streaming de audio, cabe destacar la existencia de módulos compatibles con esta tecnología que permiten aumentar su alcance.

### 2.1.2. Selección del Kit de Desarrollo con tecnología PurePath Wireless

Se procedió a realizar un análisis de los diferentes SoC disponibles con la tecnología PPW (PurePath Wireless) en base a los parámetros de operación, dicho análisis se muestra en la tabla 19.

**Tabla 19.** Clase de amplificador a emplear

<b>Parámetros</b>	<b>CC8520</b>	<b>CC8521</b>	<b>CC8530</b>	<b>CC8531</b>
<b>Voltaje de alimentación</b>	-0.3 – 3.9 V	-0.3 – 3.9 V	-0.3 – 3.9 V	-0.3 – 3.9 V.
<b>Voltaje de alimentación en operación</b>	2.0 – 3.6 V	3.0 – 3.6 V	2.0 – 3.6 V	3.0 – 3.6 V
<b>Rango de temperatura</b>	-40 – 85 °C			
<b>Consumo de corriente en reposo</b>	1 $\mu$ A	1 $\mu$ A	1 $\mu$ A	1 $\mu$ A
<b>Consumo de corriente del maestro</b>	29 Ma	29 mA	29 mA	29 mA
<b>Consumo de corriente del esclavo</b>	25 mA	25 mA	25 mA	25 mA
<b>Potencia de salida</b>	3.5 dBm	3.5 dBm	3.5 dBm	3.5 dBm
<b>Sensibilidad del receptor</b>	-83 a -86 dBm			

Elaborado por: Investigadora

Al evaluar y comparar los parámetros mostrados en la tabla 19 correspondientes a los SoC disponibles con tecnología PPW, se ha optado por el CC8531, debido a que no existe una diferencia notable entre los mismos, más que la placa en la que se montan, sin embargo para el desarrollo del presente proyecto se requirió de una entrada con conector jack 3.5mm., y el mismo se lo puede encontrar en el kit de desarrollo CC85XX.

### **Kit de desarrollo CC85XX**

El propósito principal de kit es permitir al usuario evaluar la funcionalidad de la transmisión inalámbrica, se basa en la idea de un bajo consumo de energía empleando tecnología de punta. [25]

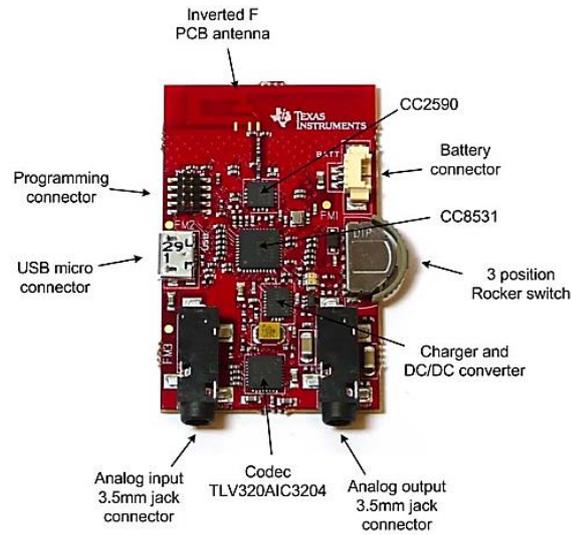
El kit de desarrollo incluye los componentes mencionados a continuación [25]:

- 2 tarjetas CC85XX.
- 2 baterías Li-ion de 1.73Wh (3.7V, 465mAh).
- 1 debugger para programar las tarjetas de acuerdo a su aplicación.
- 1 cable micro USB para carga de baterías.
- 1 cable de audio con entrada análoga (3.5mm)



**Figura 19.** Dev Kit CC85XX. [25]

La placa de kit de desarrollo CC85XX está compuesta de la siguiente forma:



**Figura 20.** Placa CC85XX. [25]

La conexión del depurador con la placa CC85XX se muestra en la figura 21:



**Figura 21.** Conexión Debugger. [25]

### 2.1.3. Selección de la clase de amplificador

En la tabla 20 se mencionan los aspectos técnicos que se consideraron para seleccionar la clase de amplificador diseñado e implementado.

**Tabla 20.** Clase de amplificador a emplear

<b>Parámetros</b>	<b>Clase A</b>	<b>Clase B</b>	<b>Clase AB</b>	<b>Clase D</b>	<b>Clase H</b>
<b>Ciclo de operación</b>	360°	180° - 360°	180°	---	---
<b>Región de trabajo del transistor</b>	Activa	Corte	Activa	Activa	Saturación
<b>Consumo</b>	Alto	<Clase AB	< Clase A	>Clase AB	>Clase AB
<b>Fuente recomendada</b>	Lineal	Simétrica	Simétrica	Conmutada	Conmutada
<b>Distorsión</b>	Media	Alta	Baja	Media	Media
<b>Rendimiento</b>	20 – 25%	25 - 60%	50 - 60%	> 90%	> 90%
<b>Pérdidas en calor</b>	Altas	Bajas	Medias	Bajas	Bajas
<b>Peso</b>	Alto	Medio	Medio	<Clase AB	<Clase AB
<b>Volumen</b>	Alto	Medio	Medio	<Clase AB	<Clase AB
<b>Aplicación</b>	Circuitos de audio, equipos domésticos de alta gama	Sistemas telefónicos, transmisores de seguridad portátiles, sistemas de alerta.	Circuitos de audio de alta calidad	Circuitos de audio con menor calidad de sonido	Circuitos de audio con calidad media de sonido

**Elaborado por:** Investigadora

Al analizar los datos de los amplificadores de potencia de acuerdo a su clase mostrados en la tabla 20, se determinó que el amplificador adecuado para el desarrollo del presente proyecto de investigación es un amplificador de clase AB, ya que permite la reproducción de audio de alta calidad, además que su característica principal radica en la baja distorsión sin afectar altamente el rendimiento.

#### **2.1.4. Selección de crossover**

En la siguiente tabla se realizó una comparativa de los distintos crossover disponibles en el mercado, teniendo en cuenta que estos deben ser de 2 vías y deben tener características de potencia similares a las del amplificador.

Es necesario mencionar que se optó por un crossover pasivo evitando de esta forma ruido que se puede generar en la etapa de amplificación que conlleve a la pérdida de calidad del sistema de amplificación del presente trabajo de investigación.

**Tabla 21.** Selección de crossover

<b>PARÁMETROS</b>	<b>ILS YLY-2088</b>	<b>ILS D-224</b>	<b>ILS 2SA1169</b>
<b>Número de vías</b>	2	2	2
<b>Potencia</b>	400 W	80 W	150 W
<b>Resistencia</b>	4 - 16 $\Omega$	4 - 8 $\Omega$	4 - 8 $\Omega$
<b>Frecuencia</b>	Ajustable	48 - 20000 Hz	48 - 20000 Hz
<b>Tamaño</b>	7 x 5 cm	7.1 x 5.2 cm	11.3 x 4.5 cm
<b>Calidad de audio</b>	Hi – Fi	Hi - Fi	Hi – Fi

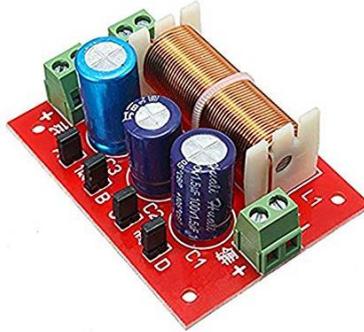
**Elaborado por:** Investigadora

De acuerdo a los datos técnicos obtenidos en la tabla 21, se ha optado por seleccionar el crossover YLY-2088, debido a que cumple con el sobredimensionamiento que se debe tener en cuenta en los equipos, destacando que el amplificador posee una potencia máxima de salida de 250W, por lo cual el crossover anteriormente mencionado cumple con la potencia necesaria, además permitió mantener la calidad de audio que se maneja hasta el amplificador, lo cual contribuye al desempeño adecuado del dispositivo.

La frecuencia ajustable de crossover se basa en jumpers, los cuales están incorporados para proporcionar una mejora en cuanto al audio, los jumpers A y B se los emplea para frecuencias bajas, y los jumpers C y D para agudos o frecuencias altas. Cada uno de los pares de puentes permiten limitar el rango de frecuencias, al quitar dichos jumpers se consigue una disminución de las frecuencias que se manejan. Las características de los puentes se manejan de acuerdo a los ítems mostrados a continuación:

- A+D proporciona un mejor bajo
- A+C proporciona graves normales y agudos claros
- A+CD proporciona claros graves y agudos normales
- AB+CD proporciona un control completo del espectro de audio, manteniendo las frecuencias medias.

La estructura que posee el crossover seleccionado se muestra a continuación:



**Figura 22.** Crossover YLY-2088. [26]

### 2.1.5. Selección de transistores de potencia

En la tabla 22 se muestra una comparación de parámetros técnicos de los transistores de potencia 2SC5200, 2SA1943, 2SA1169 y 2SC3281.

**Tabla 22.** Selección de transistores de potencia

<b>PARÁMETROS</b>	<b>2SC5200</b>	<b>2SA1943</b>	<b>2SA1169</b>	<b>2SC3281</b>
<b>Polaridad</b>	NPN	PNP	PNP	NPN
<b>Disipación total del dispositivo</b>	150 W.	150 W.	150 W.	150 W.
<b>Tensión colector-base</b>	250 V.	250 V.	200 V.	200 V.
<b>Tensión colector-emisor</b>	250 V.	250 V.	200 V.	200 V.
<b>Tensión emisor-base</b>	5 V.	5 V.	6 V.	5 V.
<b>Corriente DC máxima del colector</b>	17 A.	17 A.	15 A.	15 A.
<b>Ganancia de corriente continua</b>	55	55	80	80
<b>Empaquetado</b>	TO264	TO264	XM20	X104

**Elaborado por:** Investigadora

La selección de los transistores de potencia a emplear en el presente proyecto de investigación se basó en los parámetros mostrados en la tabla 22, de los cuales se

seleccionó los transistores 2SC5200 y 2SA1943, por sus características de polaridad, voltaje en cada uno de sus terminales, potencia y corriente máxima de acuerdo al dimensionamiento del dispositivo a implementar.

## **2.2. Métodos**

### **2.2.1. Modalidad de la Investigación**

#### **Investigación Aplicada**

Se utilizó la investigación aplicada debido a que se requiere de conocimiento vinculado al enmarque teórico en el que se enfocó el presente trabajo de investigación para plantear un sistema de amplificación con transmisión de audio inalámbrica que trabaje de forma eficiente.

#### **Investigación Bibliográfica**

El presente trabajo presentó características de investigación bibliográfica debido a que se requiere de explicación científica de los contenidos necesarios para el desarrollo de la presente investigación, por lo que se requirió el análisis de información disponible en libros, archivos, artículos, documentos, etc., que permitió estructurar la investigación de forma adecuada.

#### **Investigación de Campo**

Se empleó la investigación de campo en un enfoque cuantitativo, debido a que se recogieron y analizaron los datos arrojados en las pruebas de funcionamiento del prototipo de forma numérica.

### **2.2.2. Recolección de Información**

El presente trabajo de investigación requirió de la recopilación de información de libros, internet, revistas científicas, trabajos de investigación, papers, patentes, guía del tutor para el desarrollo del proyecto.

Además, se realizaron pruebas de funcionamiento del prototipo para comprobar la correcta transmisión de audio y recolección de datos.

### **2.2.3. Procesamiento y Análisis de Datos**

Después de recolectar la información requerida para el presente trabajo, se realizaron los siguientes procesos:

- Una vez realizadas las pruebas de funcionamiento se ingresaron los datos a un proceso estadístico, que permitieron la tabulación de los datos de forma sistemática y ordenada.
- Se destacaron tendencias y relaciones de los datos obtenidos a través de cuadros.
- La revisión de datos permitió discriminar la información para evitar errores en el sistema.

### **2.2.4. Desarrollo del proyecto**

Para el desarrollo del prototipo del presente trabajo de investigación se realizaron los siguientes pasos:

- Análisis de los sistemas de amplificación Hi-Res
- Descripción de los amplificadores empleados en sistemas Hi-Res.

- Descripción de las características de la transmisión de audio empleando el protocolo PurePath Wireless.
- Diseño del sistema de amplificación empleando tecnología HI-RES.
- Selección de elementos electrónicos que conforman el sistema de amplificación HI-RES.
- Desarrollo del prototipo del sistema de amplificación de alta calidad con transmisión inalámbrica de audio empleando el protocolo PurePath Wireless
- Configuración del dispositivo transmisor y receptor con tecnología PurePath Wireless.
- Desarrollo de pruebas de funcionamiento para comprobar la funcionalidad del dispositivo.
- Medición de parámetros de transmisión y recepción del sistema de amplificación HI-RES.
- Corrección de posibles errores que afecten el funcionamiento del sistema de amplificación y la transmisión inalámbrica de audio.
- Elaboración del Informe Final.

## **CAPÍTULO III**

### **RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

#### **3.1. Análisis y discusión de los resultados**

Para la obtención de los datos se tomaron mediciones de las variables mencionadas a continuación:

##### **3.1.1. Voltaje y Potencia de salida**

Para la toma de valores de dicha variable se conectó directamente un generador de señales a la entrada del circuito, en el cual se asignó un valor de amplitud correspondiente a 1.2V, el cual se considera como máximo dentro del rango de valores que puede tener una señal de audio, con lo cual se aprovecha el máximo el rendimiento del amplificador. Además, se conectó como carga una resistencia pura de  $4\Omega$ , que de acuerdo a la investigación realizada, es la adecuada para realizar pruebas de funcionamiento y rendimiento de un amplificador de audio.

Con los particulares mencionados anteriormente, se tuvieron las lecturas mostradas en las tablas adjuntadas a continuación en base a cada uno de los rangos como son:

- Bajos
- Altos
- Medios

De los datos mostrados en la tabla 23, se puede observar que las mediciones arrojadas muestran que a bajas frecuencias se tiene una alta potencia, llegando a un pico de 30,27 V, lo que se traduce a una potencia de 229,07 W. con una resistencia pura de  $4\Omega$ , en donde se cumple que la frecuencia inyectada al circuito es indirectamente proporcional al valor de voltaje de salida. Además, se añadió datos de potencia, a través de los cuales se pudo evaluar que se cumplió con los datos de diseño, debido a que el amplificador se diseñó para tener como potencia máxima de salida un valor de 250W.

**Tabla 23.** Mediciones de Voltaje de Salida para el rango de bajos

<b>V<sub>in</sub></b> <b>(V)</b>	<b>Z</b> <b>(<math>\Omega</math>)</b>	<b>Rango</b>	<b>f</b> <b>(Hz)</b>	<b>V<sub>out</sub></b> <b>(V)</b>	<b>P</b> <b>(W)</b>
1.2	4	Deep Bass	20	30,27	229,07
1.2	4	Low Bass	40	30,25	228,77
1.2	4	Low Bass	60	29,80	222,01
1.2	4	Mid Bass	80	29,64	219,58
1.2	4	Mid Bass	100	29,40	216,09
1.2	4	Mid Bass	160	28,70	205,92
1.2	4	Upper Bass	180	28,46	202,49
1.2	4	Upper Bass	220	28,00	196,00
1.2	4	Upper Bass	260	27,60	190,44
1.2	4	Upper Bass	300	27,10	183,60

**Elaborado por:** Investigadora

La tabla 24 contiene datos referentes a las mediciones realizadas en el rango de medios, en el cual se obtuvieron un mayor número de muestras por el alto valor de ancho de banda que posee dicho rango. De acuerdo a los datos se puede comprobar que a frecuencias medias – bajas la potencia es mayor que el rango de frecuencias medias – altas, sin embargo en el mencionado rango se encuentra un punto de estabilización del sistema de amplificación, pues el decrecimiento de la onda es mucho menor que en el rango puramente de bajos.

**Tabla 24.** Mediciones de Voltaje de Salida para el rango de medios

<b>Vin (V)</b>	<b>Z (<math>\Omega</math>)</b>	<b>Rango</b>	<b>f (Hz)</b>	<b>Vout (V)</b>	<b>P(W)</b>
1.2	4	Lower Midrange	350	26,86	180,36
1.2	4	Lower Midrange	400	26,49	175,43
1.2	4	Lower Midrange	450	25,82	166,67
1.2	4	Lower Midrange	500	25,53	162,95
1.2	4	Lower Midrange	550	24,81	153,88
1.2	4	Lower Midrange	600	24,20	146,41
1.2	4	Middle Midrange	650	23,80	141,61
1.2	4	Middle Midrange	700	23,52	138,30
1.2	4	Middle Midrange	750	23,00	132,25
1.2	4	Middle Midrange	800	22,65	128,26
1.2	4	Middle Midrange	850	22,40	125,44
1.2	4	Middle Midrange	900	22,12	122,32
1.2	4	Middle Midrange	950	22,00	121,00
1.2	4	Middle Midrange	1000	21,80	118,81
1.2	4	Middle Midrange	1050	21,54	115,99
1.2	4	Middle Midrange	1100	21,30	113,42
1.2	4	Middle Midrange	1150	21,06	110,88
1.2	4	Middle Midrange	1200	21,00	110,25
1.2	4	Upper Midrange	1300	20,85	108,68
1.2	4	Upper Midrange	1400	20,63	106,40
1.2	4	Upper Midrange	1500	20,40	104,04
1.2	4	Upper Midrange	1600	20,22	102,21
1.2	4	Upper Midrange	1700	20,10	101,00
1.2	4	Upper Midrange	1800	20,00	100,00
1.2	4	Upper Midrange	1900	19,90	99,00
1.2	4	Upper Midrange	2000	19,80	98,01
1.2	4	Upper Midrange	2100	19,66	96,63
1.2	4	Upper Midrange	2200	19,50	95,06
1.2	4	Upper Midrange	2300	19,43	94,38
1.2	4	Upper Midrange	2400	19,30	93,12
1.2	4	Presence Range	2500	18,90	89,30
1.2	4	Presence Range	2600	18,69	87,33
1.2	4	Presence Range	2800	18,00	81,00
1.2	4	Presence Range	3000	17,60	77,44
1.2	4	Presence Range	3200	17,20	73,96
1.2	4	Presence Range	3400	16,46	67,73
1.2	4	Presence Range	3600	16,00	64,00
1.2	4	Presence Range	3800	15,50	60,06
1.2	4	Presence Range	4000	15,12	57,15
1.2	4	Presence Range	4200	14,76	54,46
1.2	4	Presence Range	4400	14,20	50,41
1.2	4	Presence Range	4600	13,60	46,24
1.2	4	Presence Range	4800	13,00	42,25
1.2	4	Presence Range	5000	12,80	40,96
1.2	4	High End	5500	12,33	38,01

Elaborado por: Investigadora

Los datos mostrados en la tabla 25 muestran que el rango de agudos posee un voltaje de salida menor en contraste al voltaje de bajos, lo cual permite corroborar la relación inversa entre frecuencia y potencia, sin embargo cabe destacar que la potencia en el rango mencionado posee un decrecimiento menor en comparación con el rango de bajos.

**Tabla 25.** Medición de Voltaje de Salida para el rango de medios

<b>V<sub>in</sub></b> <b>(V)</b>	<b>Z</b> <b>(Ω)</b>	<b>Rango</b>	<b>f</b> <b>(Hz)</b>	<b>V<sub>out</sub></b> <b>(V)</b>	<b>P</b> <b>(W)</b>
1.2	4	High End	6000	12,00	36,00
1.2	4	High End	6500	11,50	33,06
1.2	4	High End	7000	11,25	31,64
1.2	4	High End	7500	11,10	30,80
1.2	4	High End	8000	10,88	29,59
1.2	4	High End	8500	10,60	28,09
1.2	4	High End	9000	10,51	27,62
1.2	4	High End	9500	10,40	27,04
1.2	4	High End	10000	10,30	26,52
1.2	4	Extremely High End	10500	10,30	26,52
1.2	4	Extremely High End	11000	10,30	26,52
1.2	4	Extremely High End	11500	10,30	26,52
1.2	4	Extremely High End	12000	10,28	26,42
1.2	4	Extremely High End	12500	10,28	26,42
1.2	4	Extremely High End	13000	10,25	26,27
1.2	4	Extremely High End	13500	10,25	26,27
1.2	4	Extremely High End	14000	10,25	26,27
1.2	4	Extremely High End	14500	10,10	25,50
1.2	4	Extremely High End	15000	10,10	25,50
1.2	4	Extremely High End	15500	10,05	25,25
1.2	4	Extremely High End	16000	10,02	25,10

**Elaborado por:** Investigadora

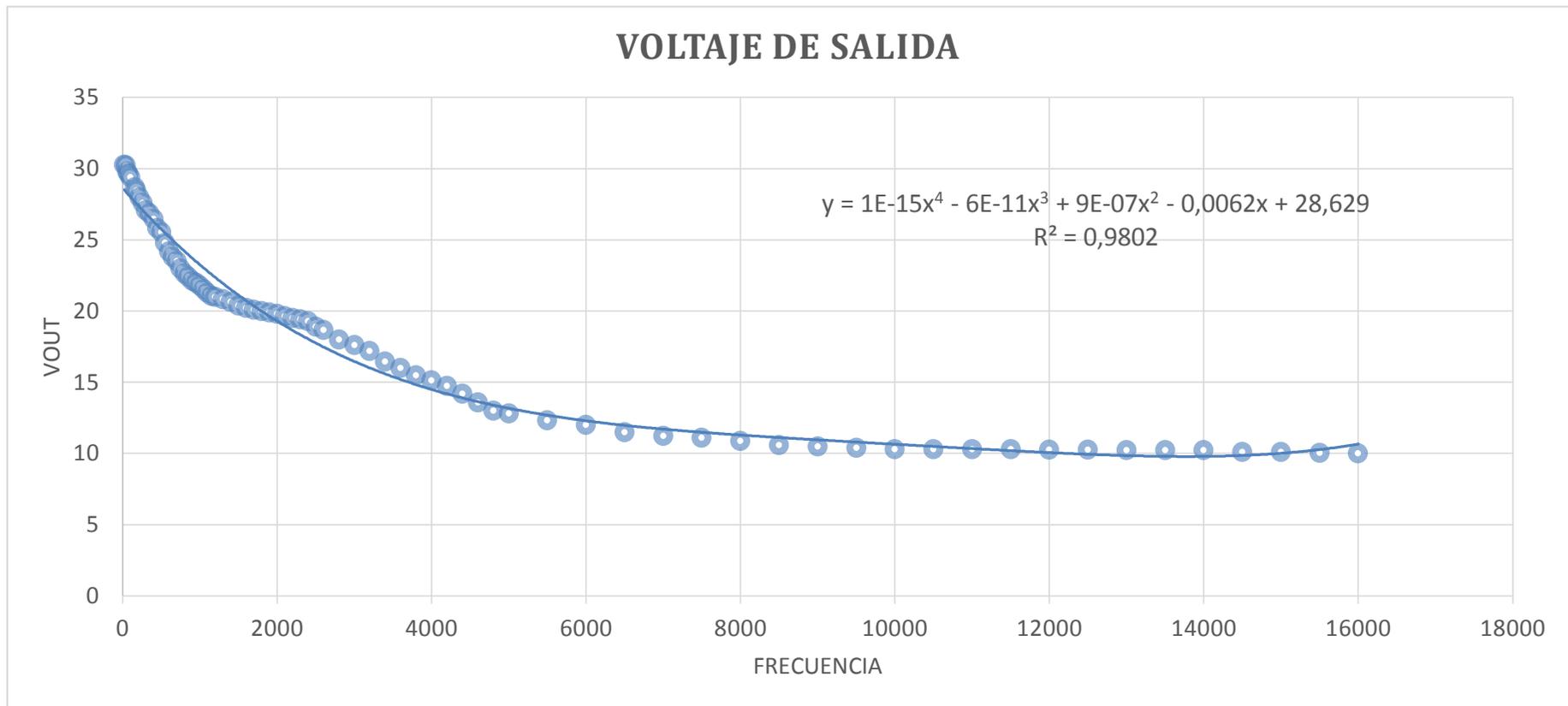
Para la representación de los datos de medición mostrados en las tablas previas se determinó la necesidad del empleo de una línea de tendencia de datos, dentro de las cuales se seleccionó como un ajuste adecuado a los valores tanto de voltaje como potencia una línea de tendencia de forma polinomial, ya que este tipo de tendencia se basa específicamente en la variación de los valores, debido a que dicho tipo de tendencia se determina por el número de fluctuaciones que se presentan en los datos, o conocidos también como ajustes de curva, en este caso se seleccionó de cuarto orden para los valores de voltaje y de sexto orden para los valores de potencia RMS, debido al número de ajustes de curva que se determinaron en los respectivos diagramas de dispersión.

Para realizar el cálculo por medio de mínimos cuadrados es necesario tener en cuenta que este tipo de línea de tendencia posee la siguiente ecuación:

$$y = m_6x^6 + m_5x^5 + m_4x^4 + m_3x^3 + m_2x^2 + m_1x + b \quad (5)$$

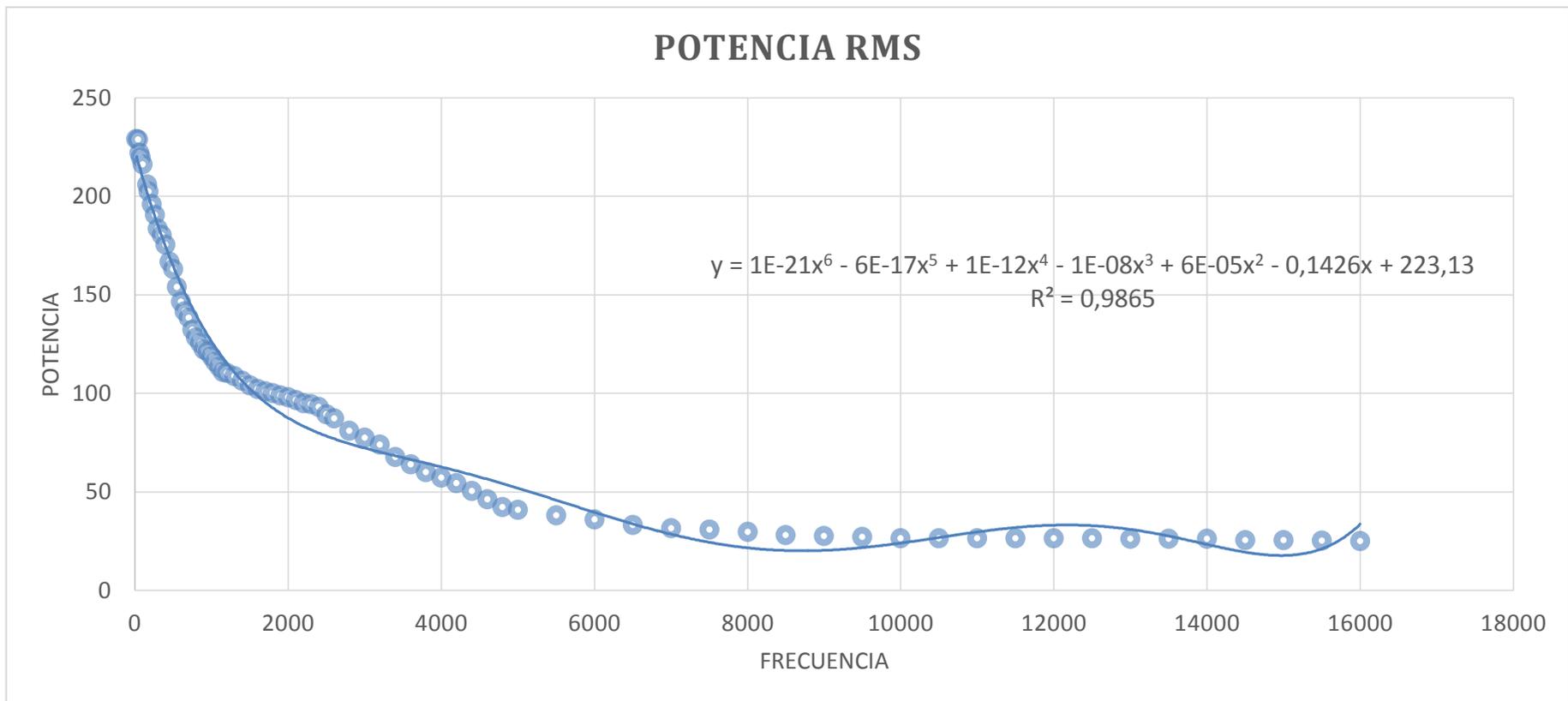
En donde  $m_n$  corresponden a los valores de error estándar para cada uno de los coeficientes dependiendo del grado del polinomio, y  $b$  es el valor de error estándar para una constante que permita obtener un ajuste adecuado de la línea de tendencia.

A continuación se muestran los diagramas de dispersión para voltaje y potencia RMS de acuerdo a las tablas 23, 24 y 25.



**Figura 23.** Mediciones de Voltaje de salida.

**Elaborado por:** Investigadora



**Figura 24.** Valores de Potencia RMS

**Elaborado por:** Investigadora

La ecuación de la línea de tendencia de la figura 23 correspondiente a los valores de voltaje de salida está dada por:

$$y = 1^{-15}x^4 - 6^{-11}x^3 + 9^{-7}x^2 - 0,0062x + 28,629 \quad (6)$$

Y su coeficiente de determinación está dado por:

$$R^2 = 0.9802 \quad (7)$$

La ecuación de la línea de tendencia de la figura 24 correspondiente a los valores de potencia de salida está dada por:

$$y = 1^{-21}x^6 - 6^{-17}x^5 + 1^{-12}x^4 - 1^{-8}x^3 + 6^{-5}x^2 - 0.1426x + 223,13 \quad (8)$$

Y su coeficiente de determinación está dado por:

$$R^2 = 0.9865 \quad (9)$$

El valor de coeficiente de determinación tanto para voltaje como potencia muestra que el ajuste del modelo seleccionado es óptimo ya que se aproxima a 1, por ende hace que el modelo sea fiable, ya que explica un 98,02% a la variable real de voltaje y un 98,65% a la variable real de potencia.

Para conocer los valores de error de cada uno de los coeficientes de las ecuaciones mencionadas anteriormente, es necesario aplicar una estimación lineal la misma que se la realizó empleando Microsoft Excel, la cual permite calcular las estadísticas de una línea de tendencia basándose en el método de mínimos cuadrados, arrojando como resultado una curva que se aproxime de mejor forma a los resultados esperados.

Al aplicar el método de regresión lineal tanto para voltaje como potencia se tienen los datos mostrados en las tablas 26 y 27:

**Tabla 26.** Estimación lineal para valores de voltaje de salida.

<b>Coefficientes</b>	<b>m4</b>	<b>m3</b>	<b>m2</b>	<b>m1</b>	<b>B</b>
	1,43651E-15	-5,78181E-11	8,74615E-07	-0,006199512	28,6287519
<b>Error estándar</b>	3,5277E-16	1,06709E-11	1,01934E-07	0,000330414	0,265499931
<b>Coefficiente de determinación</b>	0,980152346	---	---	---	---
<b>Error estándar para el cálculo y</b>	0,936849805	---	---	---	---
<b>Estadística F</b>	876,562232	---	---	---	---
<b>Grados de libertad</b>	71	---	---	---	---
<b>Suma de regresión de los cuadrados</b>	3077,391059	---	---	---	---
<b>Suma residual de los cuadrados</b>	62,3158166	---	---	---	---

**Elaborado por:** Investigadora

**Tabla 27.** Estimación lineal para valores de Potencia RMS.

<b>Coefficientes</b>	<b>m6</b>	<b>m5</b>	<b>m4</b>	<b>m3</b>	<b>m2</b>	<b>m1</b>	<b>B</b>
	1,27479E-21	-6,43041E-17	1,24691E-12	-1,17211E-08	5,63435E-05	-0,14258715	223,125172
<b>Error estándar</b>	1,70137E-22	7,86391E-18	1,36611E-13	1,10357E-09	4,14752E-06	0,00631109	2,71737134
<b>Coefficiente de determinación</b>	0,986548518	---	---	---	---		
<b>Error estándar para el cálculo y</b>	7,512813358	---	---	---	---		
<b>Estadística F</b>	843,4243848	---	---	---	---		
<b>Grados de libertad</b>	69	---	---	---	---		
<b>Suma de regresión de los cuadrados</b>	285629,1996	---	---	---	---		
<b>Suma residual de los cuadrados</b>	3894,523154	---	---	---	---		

**Elaborado por:** Investigadora

El valor de estadística F o más conocido como valor F observado, permite determinar si la relación existente entre las variables tanto dependiente como independiente es producida por azar, al igual que el valor de los grados de libertad, el cual permite conocer los valores críticos de F, y conocer el valor de confianza o fiabilidad que posee el modelo en relación a la variable analizada.

Evaluando los valores de estadística F para las tablas 26 y 27 se tiene:

$$V_{out} \ll F_v \quad (10)$$

$$30,27 \ll 876,562232$$

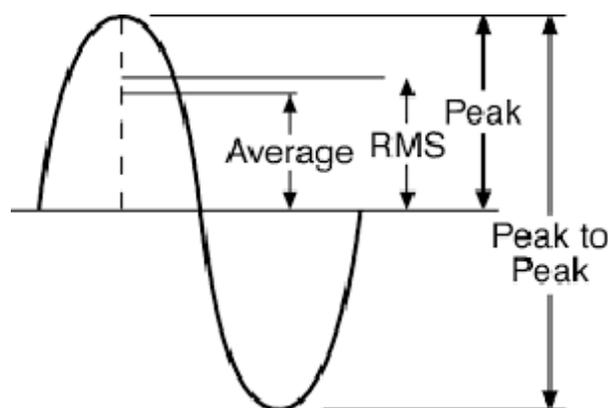
$$P_{out} \ll F_p \quad (11)$$

$$229,07 \ll 843,4243848$$

Por las relaciones mostradas anteriormente del valor F, se puede decir que es extremadamente improbable que el valor de estadística F se produzca por azar.

Cabe destacar que la potencia medida es la que puede manejar el amplificador de sonido durante intervalos prolongados de tiempo, lo cual indica que será la potencia real o potencia RMS, por lo cual es necesario indicar que la potencia nominal, conocida como PMPO (Peak Music Power Output), es aquella que un amplificador de audio soportará por un periodo de tiempo corto.

Para tener en cuenta los valores mostrados en la tabla 28, 29 y 30, es fundamental tomar en cuenta la siguiente figura:



**Figura 25.** Tipos de potencia según especificaciones de audio. [27]

En la tabla 28 se muestran los valores que posee la potencia RMS y PMPO para las distintas frecuencias comprendidas en el rango de bajos, se comprueba que la frecuencia es inversamente proporcional al valor de potencia, cabe destacar que el valor de potencia PMPO en función de la potencia RMS está dado por:

$$PMPO = RMS * \frac{2}{\frac{\sqrt{2}}{2}} \quad (12)$$

**Tabla 28.** Valores de PMPO del rango de frecuencias bajas

<b>Rango</b>	<b>f (Hz)</b>	<b>P RMS (W)</b>	<b>PMPO (W)</b>
Deep Bass	20	229,07	648,00
Low Bass	40	228,77	647,16
Low Bass	60	222,01	628,03
Mid Bass	80	219,58	621,16
Mid Bass	100	216,09	611,29
Mid Bass	160	205,92	582,52
Upper Bass	180	202,49	572,81
Upper Bass	220	196,00	554,46
Upper Bass	260	190,44	538,73
Upper Bass	300	183,60	519,38

**Elaborado por:** Investigadora

De la misma forma que en rango de bajos se puede observar en la tabla 29, la relación inversa que posee la frecuencia y potencia, no obstante al tener en cuenta que los valores pertenecientes a la tabla mencionada se tiene en cuenta el rango de medios – bajos, en el cual se tiene una mayor pérdida de potencia en la variación de frecuencia en comparación con el rango de medios – altos, en el cual se puede encontrar un punto de estabilización de la potencia y se tiene un decremento sin variaciones bruscas.

**Tabla 29.** Valores de PMPO del rango de frecuencias medias

<b>Rango</b>	<b>f (Hz)</b>	<b>P RMS (W)</b>	<b>PMPO (W)</b>
Lower Midrange	350	180,36	510,21
Lower Midrange	400	175,43	496,27
Lower Midrange	450	166,67	471,49
Lower Midrange	500	162,95	460,96
Lower Midrange	550	153,88	435,30
Lower Midrange	600	146,41	414,17
Middle Midrange	650	141,61	400,59
Middle Midrange	700	138,30	391,23
Middle Midrange	750	132,25	374,12
Middle Midrange	800	128,26	362,83
Middle Midrange	850	125,44	354,85
Middle Midrange	900	122,32	346,03
Middle Midrange	950	121,00	342,29
Middle Midrange	1000	118,81	336,10
Middle Midrange	1050	115,99	328,12
Middle Midrange	1100	113,42	320,85
Middle Midrange	1150	110,88	313,66
Middle Midrange	1200	110,25	311,88
Upper Midrange	1300	108,68	307,44
Upper Midrange	1400	106,40	300,99
Upper Midrange	1500	104,04	294,31
Upper Midrange	1600	102,21	289,14
Upper Midrange	1700	101,00	285,71
Upper Midrange	1800	100,00	282,89
Upper Midrange	1900	99,00	280,06
Upper Midrange	2000	98,01	277,26
Upper Midrange	2100	96,63	273,35
Upper Midrange	2200	95,06	268,91
Upper Midrange	2300	94,38	266,99
Upper Midrange	2400	93,12	263,42
Presence Range	2500	89,30	252,62
Presence Range	2600	87,33	247,04
Presence Range	2800	81,00	229,14
Presence Range	3000	77,44	219,07
Presence Range	3200	73,96	209,22
Presence Range	3400	67,73	191,60
Presence Range	3600	64,00	181,05
Presence Range	3800	60,06	169,90
Presence Range	4000	57,15	161,67
Presence Range	4200	54,46	154,06
Presence Range	4400	50,41	142,60
Presence Range	4600	46,24	130,81
Presence Range	4800	42,25	119,52
Presence Range	5000	40,96	115,87

**Elaborado por:** Investigadora

Al analizar los datos de la tabla 30 se puede mencionar que en el rango de altos los valores de potencia PMPO no poseen variaciones bruscas, sin embargo se tiene una respuesta en potencia adecuada con respecto a la frecuencia aplicada al amplificador, la cual al reproducir audio permite percibir las variaciones sin saturación.

**Tabla 30.** Valores de PMPO del rango de frecuencias altas

<b>Rango</b>	<b>f (Hz)</b>	<b>P RMS (W)</b>	<b>PMPO (W)</b>
High End	5500	38,01	107,52
High End	6000	36,00	101,84
High End	6500	33,06	93,52
High End	7000	31,64	89,50
High End	7500	30,80	87,13
High End	8000	29,59	83,71
High End	8500	28,09	79,46
High End	9000	27,62	78,13
High End	9500	27,04	76,49
High End	10000	26,52	75,02
Extremely High End	10500	26,52	75,02
Extremely High End	11000	26,52	75,02
Extremely High End	11500	26,52	75,02
Extremely High End	12000	26,42	74,74
Extremely High End	12500	26,42	74,74
Extremely High End	13000	26,27	74,31
Extremely High End	13500	26,27	74,31
Extremely High End	14000	26,27	74,31
Extremely High End	14500	25,50	72,14
Extremely High End	15000	25,50	72,14
Extremely High End	15500	25,25	71,43
Extremely High End	16000	25,10	71,00

**Elaborado por:** Investigadora

En la figura 26 se muestra un diagrama de dispersión de los datos de potencia PMPO de las tablas 28, 29 y 30, adicionalmente para conocer la confiabilidad de los datos de potencia se puede observar una línea de tendencia polinómica de sexto orden, la cual está descrita por la siguiente ecuación:

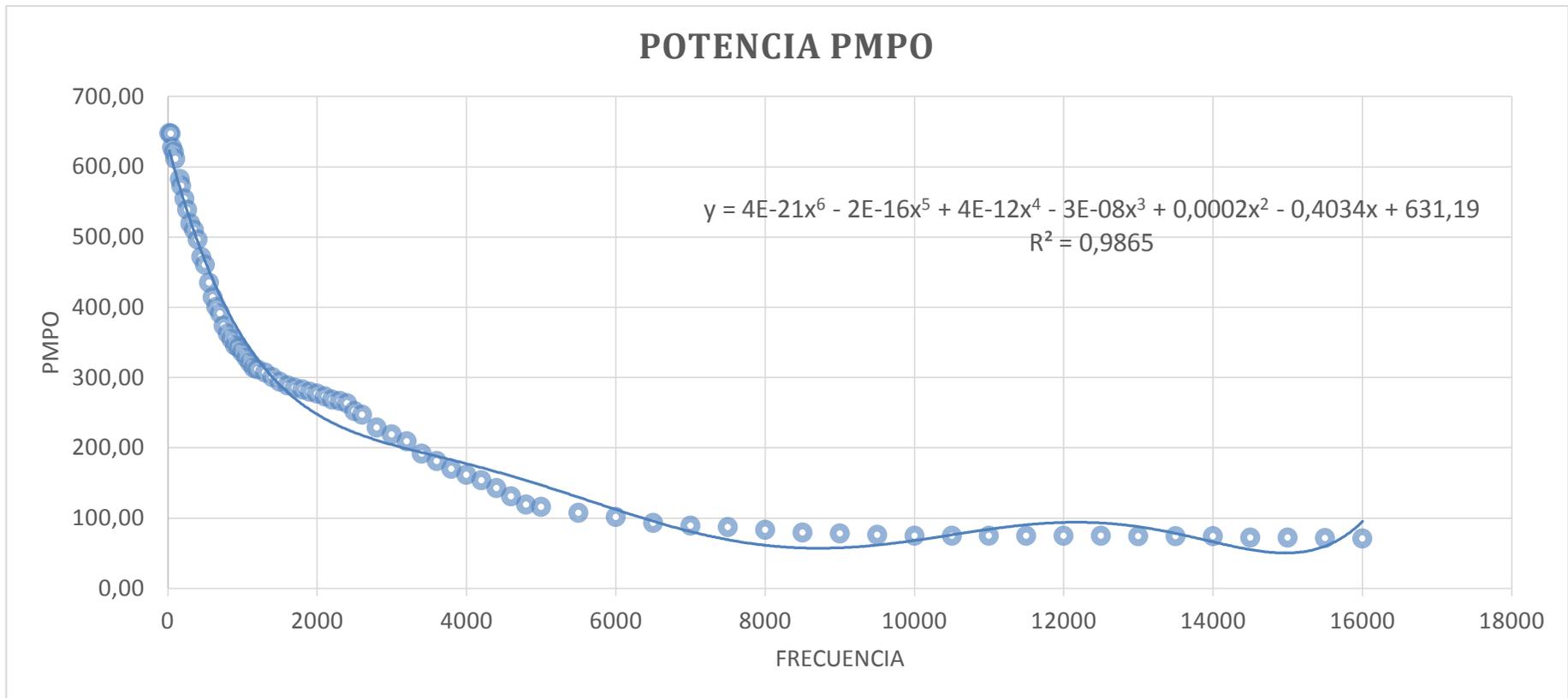
$$y = 4^{-21}x^6 - 2^{-16}x^5 + 4^{-12}x^4 - 3^{-8}x^3 + 2^{-4}x^2 - 0.4034x + 631,19 \quad (13)$$

De la misma forma que con los valores de voltaje y potencia RMS, se optó por realizar una estimación lineal de los valores obtenidos a través de la ecuación que describe la mencionada línea de tendencia, dicho procedimiento se lo realizó en el software Microsoft Excel, el cual permite tener una aproximación a la línea de tendencia ideal de acuerdo a los datos ingresados a través de mínimos cuadrados, es necesario mencionar que por ajustes que presenta la línea de tendencia polinómica se tendrán 6 coeficientes en la ecuación para explicar de mejor forma la variable real en la que se trabaja la estimación. Los datos de la estimación realizada se los puede observar en la tabla 31.

Dado que el valor del coeficiente de determinación está dado por:

$$R^2 = 0.9865 \quad (14)$$

Se concluye que la muestra que realizada para el ajuste del modelo seleccionado es óptimo ya que se aproxima a 1, teniendo en cuenta como variable la potencia PMPO de salida del amplificador, por ende hace que el modelo sea fiable, ya que explica un 98,65% a la variable real.



**Figura 26.** Valores de Potencia PMPO

**Elaborado por:** Investigadora

**Tabla 31.** Estimación lineal para valores de Potencia PMPO.

<b>Coefficientes</b>	<b>m6</b>	<b>m5</b>	<b>m4</b>	<b>m3</b>	<b>m2</b>	<b>m1</b>	<b>B</b>
	3,60618E-21	-1,81907E-16	3,52734E-12	-3,31572E-08	0,000159387	-0,40335829	631,188606
<b>Error estándar</b>	4,81292E-22	2,22459E-17	3,86452E-13	3,12183E-09	1,17327E-05	0,01785315	7,68704764
<b>Coefficiente de determinación</b>	0,986548518	---	---	---	---		
<b>Error estándar para el cálculo y</b>	21,25265448	---	---	---	---		
<b>Estadística F</b>	843,4243848	---	---	---	---		
<b>Grados de libertad</b>	69	---	---	---	---		
<b>Suma de regresión de los cuadrados</b>	2285723,885	---	---	---	---		
<b>Suma residual de los cuadrados</b>	31165,59724	---	---	---	---		

**Elaborado por:** Investigadora

### 3.1.2. Temperatura

Al evaluar el funcionamiento del amplificador se consideró necesario tener en cuenta la temperatura en el que el mismo trabaja, debido a que es un factor fundamental para conocer si existen pérdidas altas por calor, por lo cual se realizaron mediciones en los transistores de potencia 2SA1943 y 2SC5200, así como también en el disipador, los cuales se muestran en la tabla 32.

**Tabla 32.** Mediciones de valores de Temperatura

<b>HORA</b>	<b>2SA1943</b>	<b>2SC5200</b>	<b>DISIPADOR</b>
17:25	24°C	24°C	18°C
17:27	40°C	40°C	37°C
17:31	43°C	43°C	42°C
17:40	57°C	57°C	50°C
18:00	62°C	62°C	55°C
18:15	68°C	68°C	58°C
18:25	70°C	70°C	60°C
18:40	70°C	70°C	62°C
19:00	70°C	70°C	63°C
19:25	71°C	71°C	64°C
19:40	70°C	70°C	65°C
19:55	70°C	70°C	65°C

**Elaborado por:** Investigadora

Cabe mencionar que las mediciones se las realizaron hasta encontrar un punto de estabilización de la temperatura en el funcionamiento del dispositivo, además es necesario conocer que el amplificador se lo tuvo en modo de prueba por 2 horas y 30 minutos, y los datos se los verificaron durante dicho tiempo.

Para comprobar la fiabilidad de los datos se procedió a aplicar líneas de tendencia polinómicas mostradas en la figura 27, para obtener la mayor aproximación posible a los datos obtenidos a través de las mediciones, de los cuales se obtuvieron ecuaciones que describen las curvas del transistor 2SA1943, 2SC5200 y el disipador mostradas a continuación:

$$y = -3^9x^6 + 2^{10}x^5 - 3^{10}x^4 + 3^{10}x^3 - 2^{10}x^2 + 6^9x - 7^8 \quad (15)$$

$$R^2 = 0,9764 \quad (16)$$

Se concluye que la muestra que realizada para el ajuste del modelo seleccionado es óptimo ya que se aproxima a 1, teniendo en cuenta como variable la temperatura del amplificador en el transistor 2SA1943, por ende hace que el modelo sea fiable, ya que explica un 97,64% a la variable real.

$$y = -3^9x^6 + 2^{10}x^5 - 3^{10}x^4 + 3^{10}x^3 - 2^{10}x^2 + 6^9x - 7^8 \quad (17)$$

$$R^2 = 0,9764 \quad (18)$$

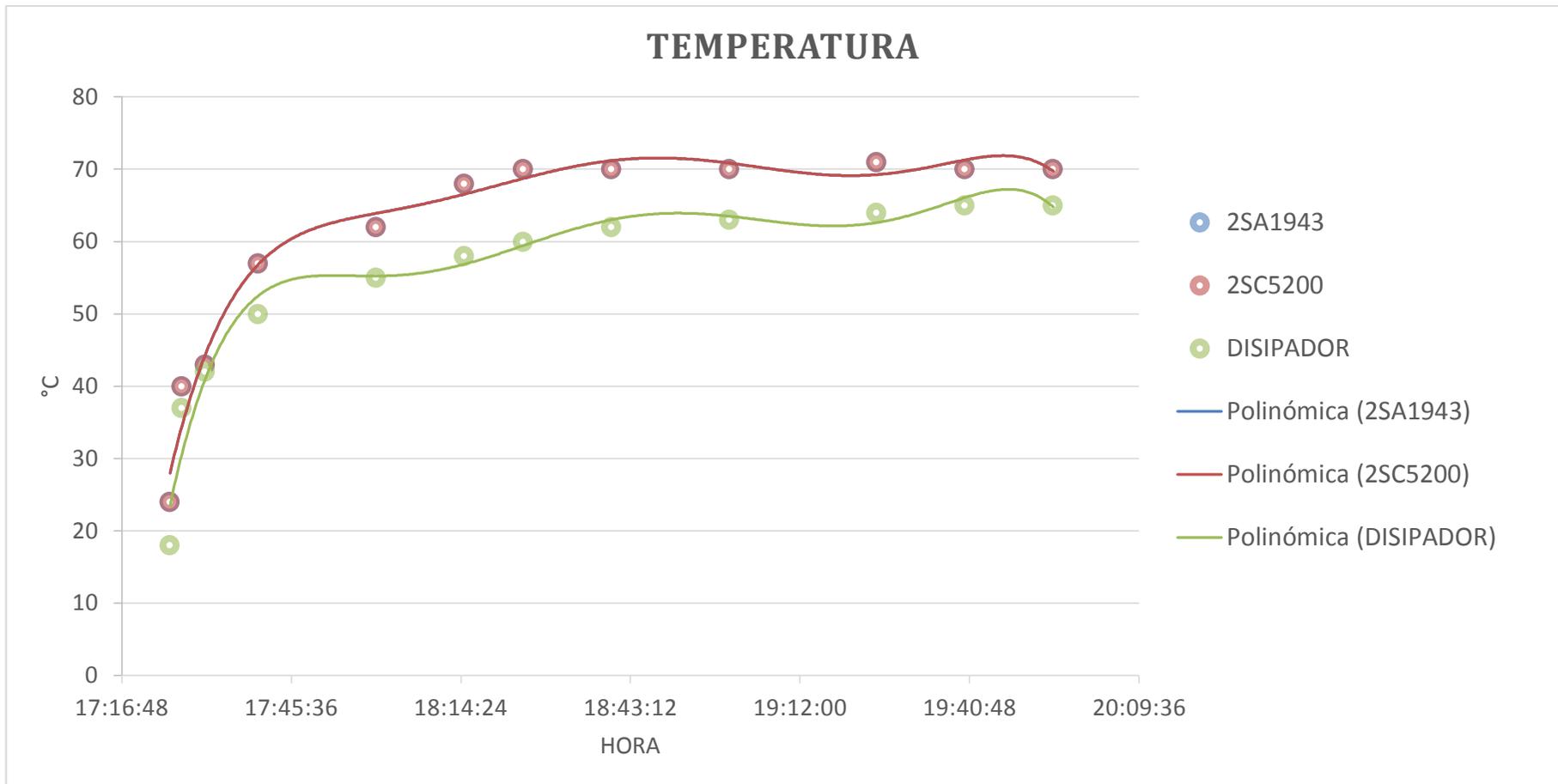
Se concluye que la muestra que realizada para el ajuste del modelo seleccionado es óptimo ya que se aproxima a 1, teniendo en cuenta como variable la temperatura del amplificador en el transistor 2SC5200, por ende hace que el modelo sea fiable, ya que explica un 97,64% a la variable real.

$$y = -4^9x^6 + 2^{10}x^5 - 4^{10}x^4 + 4^{10}x^3 - 2^{10}x^2 + 8^9x - 1^9 \quad (19)$$

$$R^2 = 0,9626 \quad (20)$$

Se concluye que la muestra que realizada para el ajuste del modelo seleccionado es óptimo ya que se aproxima a 1, teniendo en cuenta como variable la temperatura del amplificador en el disipador, por ende hace que el modelo sea fiable, ya que explica un 96,26% a la variable real.

Es necesario mencionar que la toma de datos de temperatura se lo realizó en los tres puntos de medición simultáneamente para evitar errores y tener datos verídicos en el sentido de trabajo en la misma frecuencia y potencia.



**Figura 27.** Mediciones de temperatura de trabajo del dispositivo

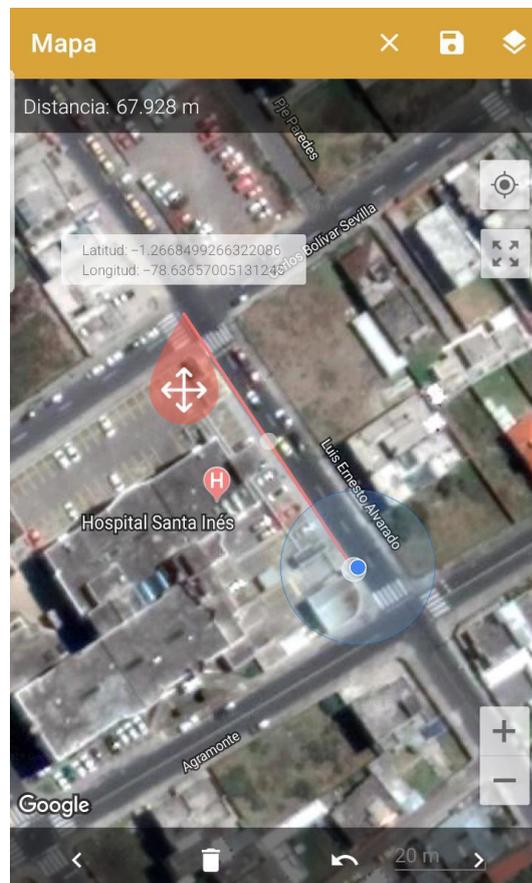
**Elaborado por:** Investigadora

### 3.1.3. Distancia de transmisión y recepción inalámbrica

Para medir la variable distancia de transmisión y recepción inalámbrica empleando las tarjetas maestro y esclavo del kit con tecnología PurePath Wireless se tomó en cuenta los siguientes escenarios:

- **Con línea de vista directa**

La medición se la realizó en el Barrio La Floresta ubicado en la ciudad de Ambato, en las calles Luis Ernesto Alvarado y Carlos Bolívar Sevilla, dicha ubicación fue seleccionada por la poca concurrencia de automóviles y personas, para tener las menores pérdidas por obstáculos, la mayor distancia alcanzada con el dispositivo fue de 67,928 m. como se muestra en la siguiente figura.

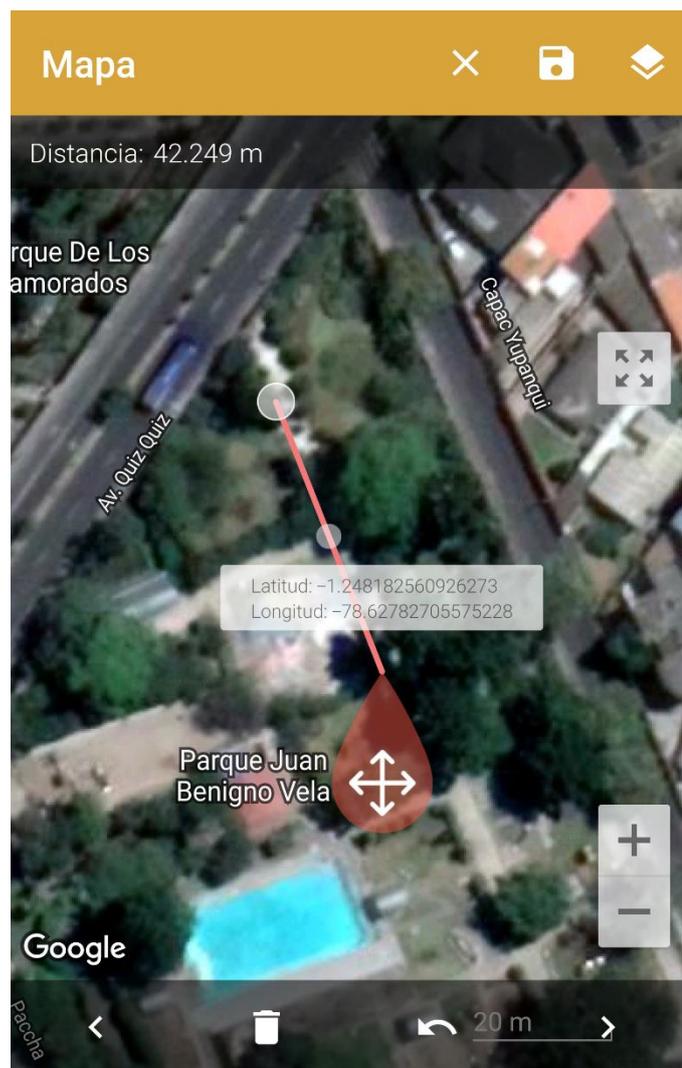


**Figura 28.** Medición de distancia de TX y RX con Línea de vista directa.

**Elaborado por:** Investigadora

- Sin línea de vista directa

La medición se la realizó en el Barrio Bellavista de la ciudad de Ambato, en las calles Quiz-Quiz y Capac Yupanqui, en el interior del parque Juan Benigno Vela, la medición arrojó una distancia máxima de 42,249 m. teniendo en cuenta que dicha ubicación posee una alta concurrencia de personas, y además cuenta con vegetación.



**Figura 29.** Medición de distancia de TX y RX sin Línea de vista directa.

**Elaborado por:** Investigadora

### 3.1.4. Rendimiento del amplificador

Para tener en cuenta un valor de rendimiento del amplificador es necesario mencionar que el rango para los amplificadores AB es aproximadamente de 50 a 60%.

A continuación se muestra el cálculo de dicho valor.

$$I = 2.87 A$$

$$V = 129.4 V$$

$$P_i = VI \tag{21}$$

$$P_i = 129.4 * 2.87$$

$$P_i = 371.378W$$

La potencia de salida  $P_o$  se la tomó directamente de las mediciones mostradas en la tabla 23.

$$P_o = 229.07 W \tag{22}$$

$$\eta = \frac{P_o}{P_i} \tag{23}$$

$$\eta = \frac{229.07}{371.378}$$

$$\eta = 0.6168$$

$$\eta(\%) = 61,68\%$$

### 3.1.5. Parámetros de transmisión y recepción

Para la medición de los parámetros de transmisión se empleó como generador de señales un celular, en el cual se instaló una aplicación que cumpla con el objetivo de arrojar señales en el rango audible y a una amplitud dentro de los rangos establecidos para audio, dichos valores se muestran en la tabla 33:

**Tabla 33..** Valores establecidos en el generador de señales.

MAGNITUD	Valor
Amplitud	50 mV
Frecuencia	10 kHz

**Elaborado por:** Investigadora

En las figuras 30 y 31 se muestran las ondas generadas a partir de la aplicación instalada en el celular, la cual corresponde al canal izquierdo y derecho respectivamente.



**Figura 30.** Onda transmitida en el canal izquierdo.

**Elaborado por:** Investigadora



**Figura 31..** Onda transmitida en el canal derecho.

**Elaborado por:** Investigadora

En las figuras 32 y 33 se puede observar las ondas receptadas tanto en el canal izquierdo como derecho respectivamente, destacando que cada canal es receptado por distintas placas, a cada una de las cuales se las asignó como esclavo, para cumplir con la topología punto a multipunto, teniendo un solo maestro que envía la señal de audio a cada una de las tarjetas.



**Figura 32.** Onda receptada en el canal izquierdo.

**Elaborado por:** Investigadora



**Figura 33.** Onda receptada en el canal derecho.

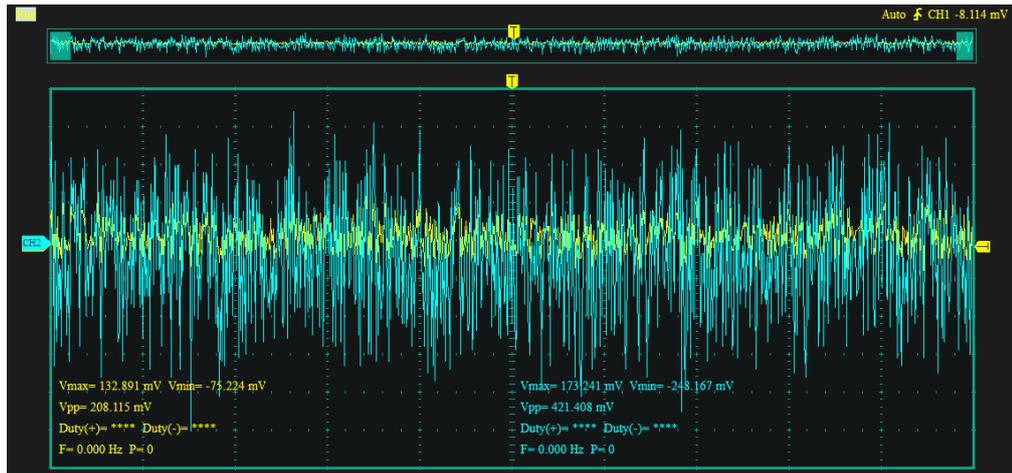
**Elaborado por:** Investigadora

### 3.1.6. Parámetros de amplificación

En las imágenes 34, 35 y 36 se tienen formas de onda para evaluar la calidad del sistema de amplificación y transmisión, la onda amarilla indica la señal de entrada y la onda celeste muestra la señal de salida

- **Ruido blanco**

En la siguiente figura se muestra la onda de entrada y salida del sistema de amplificación teniendo en cuenta que al circuito se aplicó una señal de ruido blanco como entrada, el cual se caracteriza por generar una señal que posee todas las frecuencias correspondientes al rango audible con la misma densidad espectral de potencia.



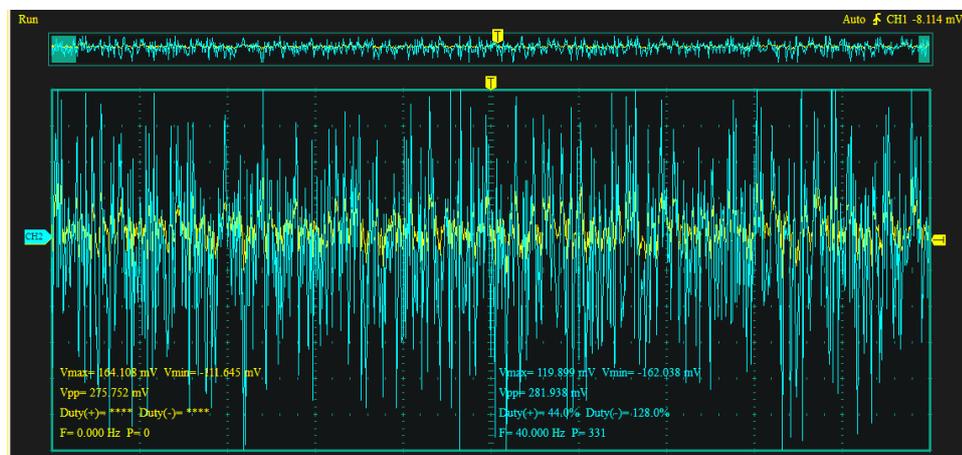
**Figura 34.** Onda de entrada y salida del amplificador con entrada de ruido blanco.

**Elaborado por:** Investigadora

- **Ruido rosa**

En la figura 35 se muestra el espectro generado tanto en señal de entrada como de salida, una vez inyectado una señal de ruido rosa al circuito.

Dicho ruido se caracteriza por tener un rango de frecuencias entre 20 – 20000 Hz, rango que es percibido por el oído humano, su densidad espectral de potencia es inversamente proporcional a la frecuencia generada en la señal.



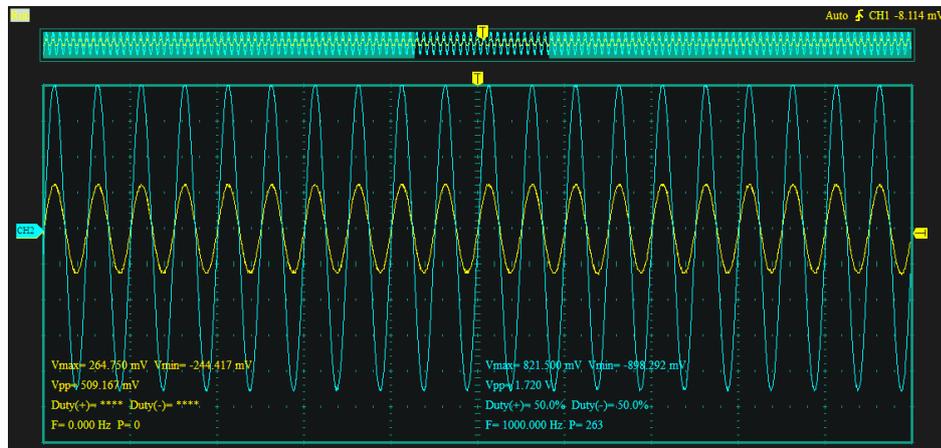
**Figura 35.** Onda de entrada y salida del amplificador con entrada de ruido rosa.

**Elaborado por:** Investigadora

- **Frecuencia constante de 1 kHz**

Se estableció una frecuencia fija de 1 kHz, la cual alimentó el circuito de amplificación a través de la placa transmisora con tecnología PurePath Wireless, para poder evaluar la señal tanto de entrada como de salida teniendo en cuenta todo el sistema de amplificación implementado, y comprobar de esta forma el correcto desempeño del mismo.

Dicha medición se muestra en la siguiente figura:



**Figura 36.** Onda de entrada y salida del amplificador con entrada de 1 kHz.

**Elaborado por:** Investigadora

Uno de los parámetros a tener en cuenta en la figura 36, además de la amplitud de cada una de las ondas, es la fase que poseen las ondas de entrada y salida, ya que esto determina el retardo existente entre el transmisor y el receptor, por lo cual se puede decir con certeza que el diseño está en fase, por lo cual la latencia mínima o inexistente en el sistema de amplificación.

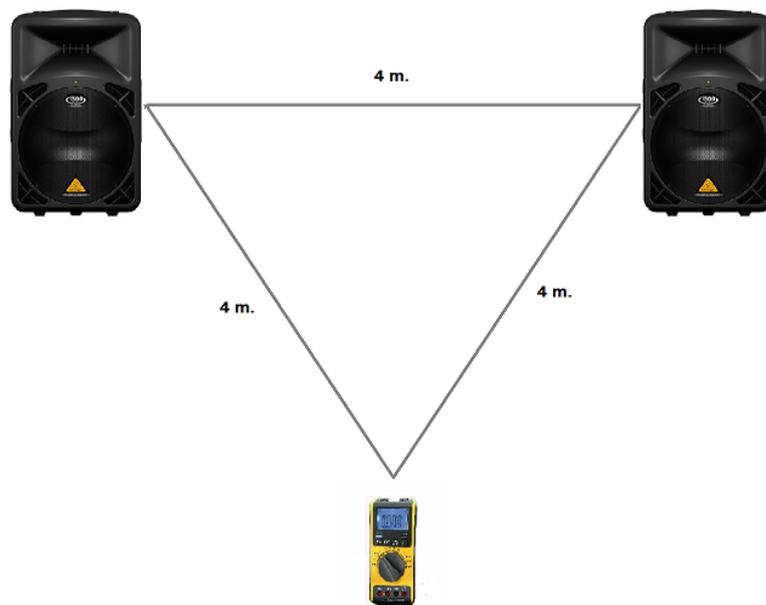
### 3.1.7. Prueba de calibración de equipos

Para realizar la prueba de calibración de las cajas amplificadas se empleó como instrumento de medición un sonómetro con un rango de medición de  $35 - 100 \pm 4$  dB.

La variable analizada por medio de la medición es el nivel de presión sonora. Para una correcta calibración se empleó como señal a transmitir ruido rosa, ya que el mismo incluye todas las frecuencias del espectro audible con variación en la densidad de potencia en cada una de las mismas.

Es primordial tener una ubicación adecuada del sonómetro, ya que de esta depende una óptima calibración, por lo cual se respeta formar un triángulo equilátero entre las cajas amplificadas y el sonómetro, ya que de esta forma el sonido de los amplificadores pueda ser captado con la misma intensidad de cada lado.

A continuación se muestra un esquema de la topología para la calibración:



**Figura 37.** Ubicación de equipos para calibración

**Elaborado por:** Investigadora

Cabe destacar que para tener una medición real, es necesario tomar en cuenta los valores que se muestran cuando no existe señal del amplificador, dicha medición se muestra en la figura 38:



**Figura 38.** Medición inicial de la calibración.

**Elaborado por:** Investigadora

En la tabla adjuntada a continuación se muestran las mediciones arrojadas de acuerdo al volumen asignado a cada uno de los amplificadores.

**Tabla 34.** Mediciones SPL de calibración

<b>Vol aprox (%)</b>	<b>SPL (dB)</b>
0 – 5	55.70
5 – 10	56.00
10 – 15	56.70
25 – 30	67.30
30 – 35	67.90
50 – 55	75.70
55 – 60	76.90
60 – 65	77.10
65 – 70	80.10
70 – 75	83.60
75 – 80	84.20
80 – 85	85.70
90-100	90.80

**Elaborado por:** Investigadora

En las siguientes figuras se muestra la topología en forma física.



**Figura 39.** Prueba de calibración

**Elaborado por:** Investigadora



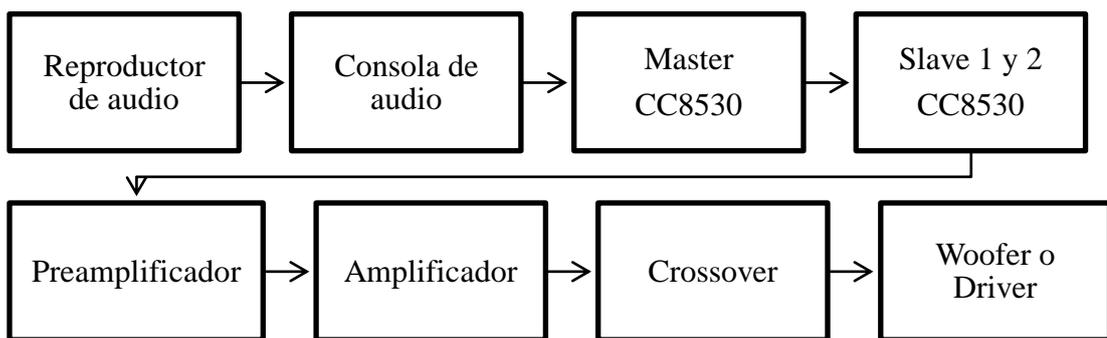
**Figura 40.** Topología para prueba de calibración

**Elaborado por:** Investigadora

### 3.2.Desarrollo de la propuesta

Para la realización del diseño del sistema de amplificación del presente proyecto de investigación se tomaron en cuenta elementos seleccionados previamente como tipo de amplificador, transistores de potencia e integrados para el amplificador.

Cabe mencionar que la arquitectura del proyecto está regida por los siguientes componentes desde una visión global:



**Figura 41.** Esquema de componentes del sistema de amplificación.

**Elaborado por:** Investigadora

Dentro del diseño propuesto del sistema amplificación se definen las etapas mencionadas a continuación:

#### 3.2.1. Amplificador de audio

##### 3.2.1.1.Etapa de preamplificación de la señal

Como se puede observar en la figura 42 la alimentación del circuito es de  $\pm 60$  V., más cabe destacar que el amplificador operacional soporta hasta  $\pm 15$  V., por lo que se consideró como un requisito agregar diodos zener de 15V. en polarización RZ, dando como resultado la resistencia requerida para el zener el valor obtenido en la ecuación:

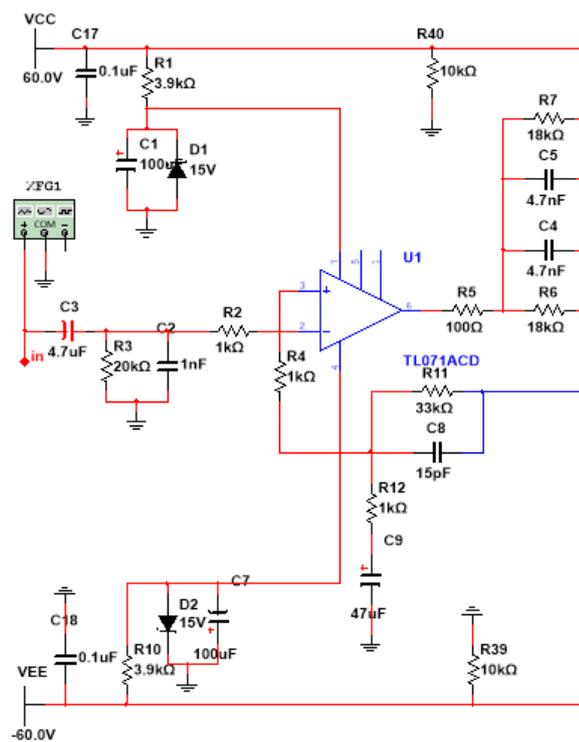
$$RZ = \frac{(V - Vd)}{Id} \quad (24)$$

$$I_d = 0.02 \text{ A} \quad (25)$$

$$R_Z = \frac{60 - 15}{0.02}$$

$$R_Z = 2.25 \text{ k}\Omega$$

Entre los valores más cercanos al obtenido se tiene  $2.2 \text{ k}\Omega$ ,  $2.7 \text{ k}\Omega$  y  $3.9 \text{ k}\Omega$ , no obstante se optó por el tercer valor, para evitar un voltaje mayor a  $\pm 15 \text{ V}$ .



**Figura 42.** Diseño de etapa de amplificación de señal

**Elaborado por:** Investigadora

La utilización de un amplificador operacional en el diseño del amplificador para el desarrollo del presente trabajo de investigación, se fundamentó en disponer de un preamplificador de pequeño tamaño dentro del circuito amplificador, que permita variar la ganancia del circuito o en otras palabras disminuir o aumentar el nivel del sonido o audio, con la variación de las resistencias colocadas al mismo.

La configuración mencionada anteriormente se la realizó con resistencias en serie conectadas a la entrada no inversora del circuito integrado, por lo tanto, la figura 42 muestra que la ganancia del circuito está dada por:

$$G = \frac{33 \text{ k}\Omega}{1 \text{ k}\Omega} \quad (26)$$

$$G = 33$$

La selección de resistencias para el filtro de entrada al terminal inversor del amplificador operacional se muestra en las siguientes ecuaciones, no obstante se seleccionó como frecuencia 8kHz debido a que el rango audible engloba desde 20 Hz a 16kHz, por lo tanto la frecuencia media del ancho de banda fue considerada para los cálculos.

$$C2 = 1 \times 10^{-9} \text{ F}$$

$$R4 = \frac{1}{2\pi f C2} \quad (27)$$

$$R3 = \frac{1}{2\pi(8 \times 10^3)(1 \times 10^{-9})}$$

$$R3 = 19894 \Omega$$

$$R3 \approx 20 \text{ k}\Omega$$

$$R2 = R4 = \frac{R3}{G} \quad (28)$$

$$R2 = R4 = \frac{20 \text{ k}\Omega}{33}$$

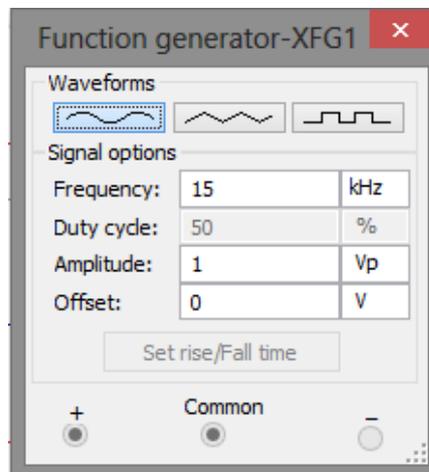
$$R2 = R4 = 606.06 \Omega$$

$$R2 = R4 \approx 1 \text{ k}\Omega$$

Los condensadores de  $100\mu\text{F}$  (C1 y C7) se emplearon como protección para evitar picos de corriente, el capacitor de  $15\text{pF}$  (C8), se lo colocó en una conexión en paralelo con una de las resistencias que fijan la ganancia del amplificador para eliminar ruido proveniente de la retroalimentación de audio. De la misma forma los condensadores de  $4.7\mu\text{F}$  (C3) y  $47\mu\text{F}$  (C9) se los emplearon como desacoplo, los cuales permitieron obtener un componente de corriente directa mucho más pura eliminando la señal de la componente de corriente alterna.

Las resistencias de  $18\text{ k}\Omega$  (R6 y R7) en conexión en paralelo con los condensadores de  $4.7\mu\text{F}$  (C4 y C5), se emplearon para lograr enviar la misma señal a los dos semiciclos en los cuales se amplifica la señal.

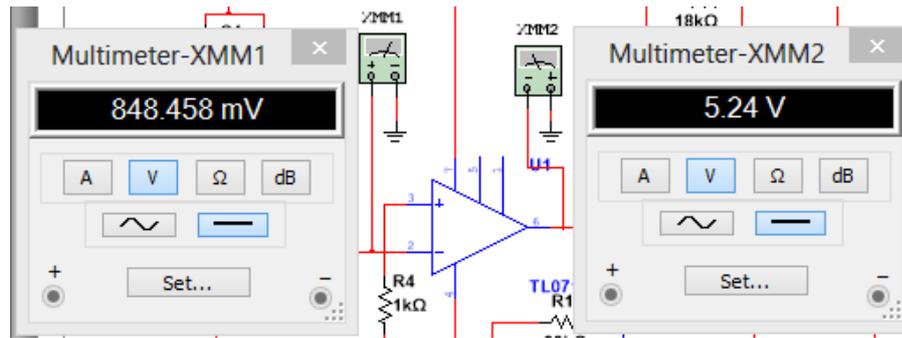
Para realizar mediciones dentro de la simulación se ingresaron los siguientes datos de señal de entrada al circuito:



**Figura 43.** Señal de entrada.

**Elaborado por:** Investigadora

En la figura 44, se muestran los valores máximos de voltaje de entrada y salida en el preamplificador diseñado a partir de un circuito integrado TL071, teniendo en cuenta los valores mostrados en la figura 43.



**Figura 44.** Mediciones en el preamplificador con CI TL071.

**Elaborado por:** Investigadora.

### 3.2.2. Etapa de amplificación de corriente y corrección de bias

Para la corrección de bias del circuito se empleó un transistor 2SD669 (Q5), el cual permitió que el voltaje permanezca estable en 0.6V de acuerdo a su datasheet, lo que hace que los drivers se mantengan en el límite de la conducción para evitar distorsiones.

La amplificación de corriente se basó en una configuración Darlington, la cual está conformada por 2 transistores MJE15031G o A940 (Q1 y Q3) y 2 transistores MJE15030G o C2073 (Q2 y Q4), la amplificación de la corriente con la configuración seleccionada se basó en la ganancia de corriente continua de cada uno de los transistores, por lo cual se respetan los siguientes parámetros:

$$I_{eQ1} = h_{fe1} \cdot I_{bQ1} \quad I_{bQ3} \quad (29)$$

$$I_{eQ3} = h_{fe3} \cdot I_{bQ3} \quad (30)$$

$$I_{eQ4} = h_{fe4} \cdot I_{bQ4} \quad I_{bQ3} \quad (31)$$

$$I_{eQ5} = h_{fe5} \cdot I_{bQ5} \quad I_{bQ3} \quad (32)$$

$$h_{fe} = h_{fe1} = h_{fe5} = h_{fe3} = h_{fe4} = 40$$

$$I_{eQ1} = I_{bQ5} \quad (33)$$

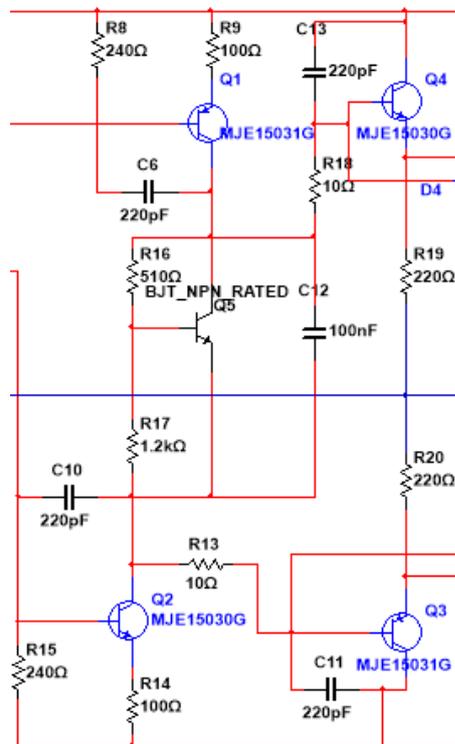
$$I_{eQ5} = h_{fe} \cdot I_{eQ1} \quad (34)$$

$$I_{eQ5} = (h_{fe})^2 \cdot I_{bQ1}$$

$$I_{eQ3} = I_{bQ4} \quad (35)$$

$$I_{eQ4} = h_{fe} \cdot I_{eQ3} \quad (36)$$

$$I_{eQ4} = (h_{fe})^2 \cdot I_{bQ3}$$



**Figura 45.** Diseño de etapa de amplificación de corriente y corrección de bias

**Elaborado por:** Investigadora

De la misma forma que en la etapa de amplificación se requirió eliminar corrientes parásitas, y ruido de forma que se mantenga lo más impecable posible la señal de entrada por lo cual fue necesario añadir capacitores de 220pF (C6, C10, C11 y C13).

Como protección de cada uno de los transistores se añadieron resistencias de 10  $\Omega$ , 100  $\Omega$ , 220 $\Omega$ , 240  $\Omega$ , 510  $\Omega$  y 1.2k $\Omega$  (R8, R9, R13, R14, R15, R16, R17, R18, R19 y R20) para evitar los picos de corriente.

En base a los datos de entrada mostrados en la figura 43, se procedió a realizar las mediciones en cada uno de los transistores para comprobar la amplificación de la corriente.

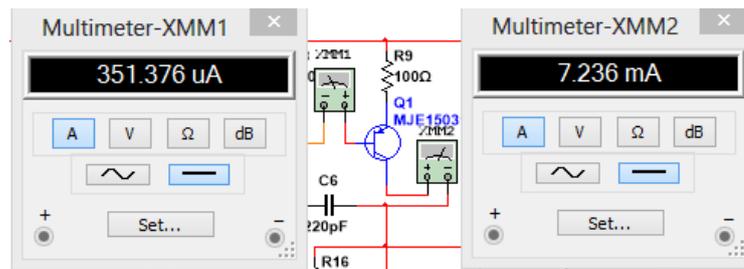


Figura 46. Amplificación de corriente en Q1.

Elaborado por: Investigadora

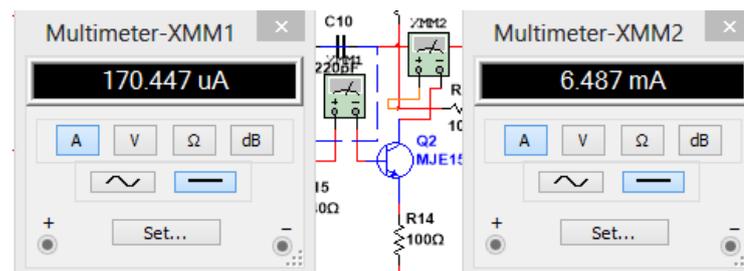


Figura 47. Amplificación de corriente en Q2.

Elaborado por: Investigadora

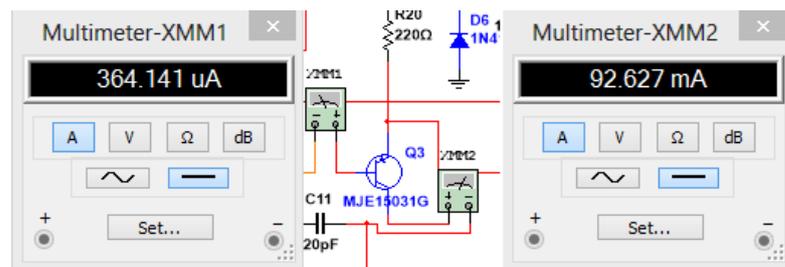
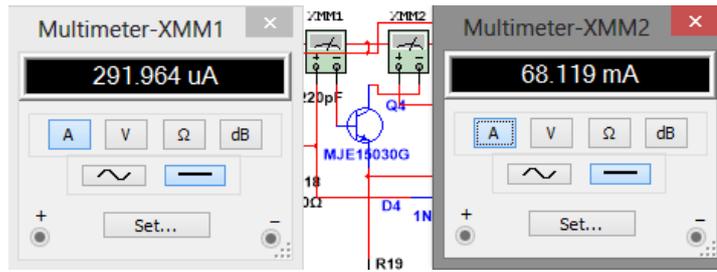


Figura 48. Amplificación de corriente en Q3.

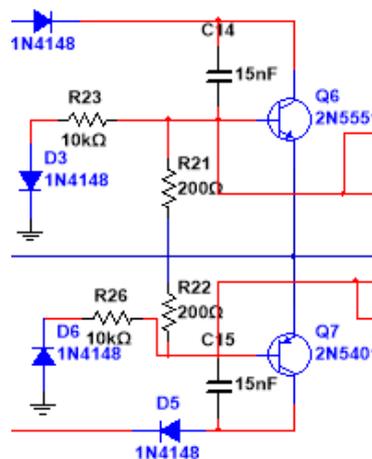
Elaborado por: Investigadora



**Figura 49.** Amplificación de corriente en Q4.

**Elaborado por:** Investigadora

### 3.2.3. Etapa de protección de salida



**Figura 50.** Diseño de etapa de protección de salida

**Elaborado por:** Investigadora

Para protección del circuito se añadieron al diseño cuatro diodos rectificadores 1N4148, que permitieron incrementar la protección a los transistores con respecto a corrientes parásitas o picos de corriente que se produzcan en cambios bruscos de frecuencia de la señal de entrada de audio.

La configuración de cada uno de los transistores de esta etapa se basó en un condensador en derivación del emisor, lo cual permitió que las corrientes de señal a tierra se deriven proporcionando una mejor respuesta en frecuencia al amplificador como se muestra a continuación:

$$X_c = \frac{1}{10} R_e \quad (37)$$

$$X_c = \frac{1}{10} (10200)$$

$$X_c = 1020 \Omega$$

$$C_e = \frac{1}{2\pi f X_c} \quad (38)$$

$$C_e = \frac{1}{2\pi (1020)(9.872 \times 10^3)}$$

$$C_e = 15.805 \text{ nF}$$

$$C_e \approx 15 \text{ nF}$$

La frecuencia seleccionada se la tomo del rango de medios y agudos de las señales de audio la cual está dada por:

$$AB = 20 \times 10^3 - 256 \quad (39)$$

$$AB = 19744 \text{ Hz}$$

$$f = \frac{AB}{2} \quad (40)$$

$$f = \frac{19744}{2}$$

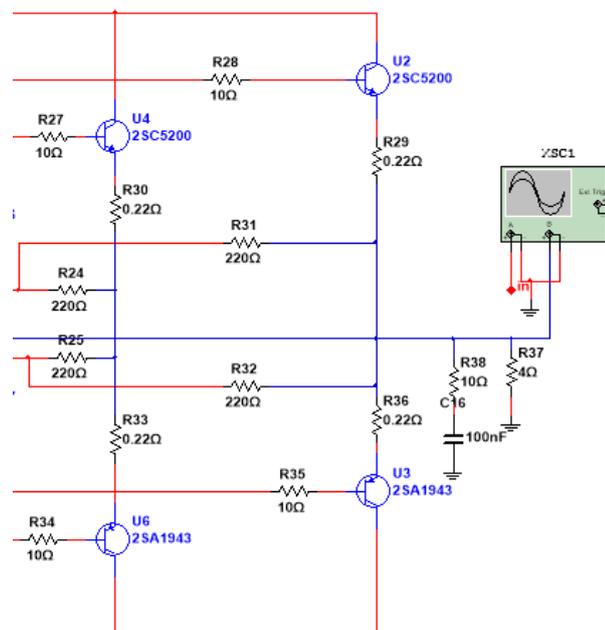
$$f = 9872 \text{ Hz}$$

Las resistencias asumidas tomaron valores de 10kΩ y 200 Ω (R21, R22, R23 y R26). Cabe destacar que esta etapa recibe la señal proveniente del preamplificador realizado con el circuito integrado TL071, por lo cual fue necesario tener en cuenta la correcta

conexión de los transistores, debido a que una inadecuada conexión produciría ruido en el audio y degradaría la calidad del sonido amplificador.

### 3.2.4. Etapa de amplificación AB

El diseño de la etapa de amplificación mostrado en la figura 51, se basó en un amplificador de potencia complementario, por lo cual se empleó transistores PNP y NPN, 2 de cada uno respectivamente, para mantener los ciclos de la señal de audio, además la carga que soporta es de  $4\Omega$ .



**Figura 51.** Diseño de etapa de amplificación AB.

**Elaborado por:** Investigadora

Al emplear los transistores 2SC5200 Y 2SA1943 se pudo asegurar una distorsión armónica de bajo valor para mantener la calidad de audio y acoplar el diseño a la tecnología HI-RES.

En esta etapa se emplearon resistencias de  $0.22\Omega$  a  $5W$  como protección de los transistores, las cuales como se muestran en la figura 32 se conectaron entre la salida y el terminal emisor del transistor. La selección del valor de dichas resistencias se basó en:

$$R_{protección} < R_{carga} \quad (41)$$

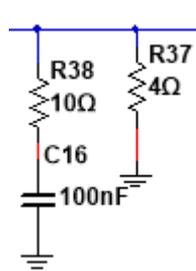
Respetando los valores comerciales disponibles de acuerdo a la potencia:

$$0.22\Omega < 4\Omega$$

De la misma forma los transistores requirieron de protección adicional en sus terminales por lo cual se añadieron resistencias de  $10\Omega$  y  $220\Omega$  evitando así picos de corriente directos en dichos terminales, que desencadenen daños de los transistores.

Se procedió a añadir una red Zobel, la cual posee una conexión en serie RC en paralelo a la carga. Se la empleó para mantener una carga constante e independiente de la frecuencia a los transistores de salida. Para lo cual es necesario tener en cuenta que la impedancia del parlante viene dada por un circuito en serie RL. [28]

Dicho circuito está conformado por los elementos mostrados en la figura:



**Figura 52.** Red Zobel

**Elaborado por:** Investigadora

$$Z_z = R_z - jXC_z = R_{38} + jXC_{16} \quad (42)$$

$$Z_l = R_l + jXL_l = R_{37} + jX_l \quad (43)$$

$$Z = \frac{(Z_l)(Z_z)}{(Z_l) + (Z_z)} \quad (44)$$

$$Z = \frac{(R_l + jXL_l)(R_z - jXC_z)}{(R_l + jXL_l) + (R_z - jXC_z)}$$

$$Z = \frac{RlRz - jXCz Rl + jX Ll Rz - j^2 X Ll XCz}{Rl + jX Ll + Rz - jXCz}$$

$$Z = \frac{RlRz \left\{ 1 + \left[ \frac{X Ll XCz}{Rl Rz} \right] + j \frac{[(X Ll Rz) - (XCz Rl)]}{Rl Rz} \right\}}{Rl + jX Ll + Rz - jXCz}$$

En caso de resonancia:

$$X Ll = XCz \quad (45)$$

$$Z = \frac{RlRz \left\{ 1 + \left[ \frac{X Ll XCz}{Rl Rz} \right] \right\}}{Rl + Rz}$$

$$Rl = Rz \quad (46)$$

$$Z = \frac{Rl}{2} \left\{ 1 + \left[ \frac{X Ll XCz}{Rl^2} \right] \right\}$$

$$\left\{ 1 + \left[ \frac{X Ll XCz}{Rl Rz} \right] \right\} = 2$$

$$\frac{X Ll XCz}{Rl Rz} = 1$$

$$X Ll = 2\pi f Ll \quad (47)$$

$$XCz = \frac{1}{2\pi f Cz} \quad (48)$$

$$Cz = \frac{Ll}{Rl} \quad (49)$$

Como condición de diseño de una Red Zobel es necesario adoptar los siguientes valores en casos prácticos:

$$Rz = 10\Omega$$

$$Cz = 100 \text{ nF}$$

Teniendo en cuenta los valores mostrados anteriormente configurados en la fuente de entrada:

$$f = 15 \text{ kHz}$$

$$XCz = \frac{1}{2\pi(15 \times 10^3)(100 \times 10^{-9})}$$

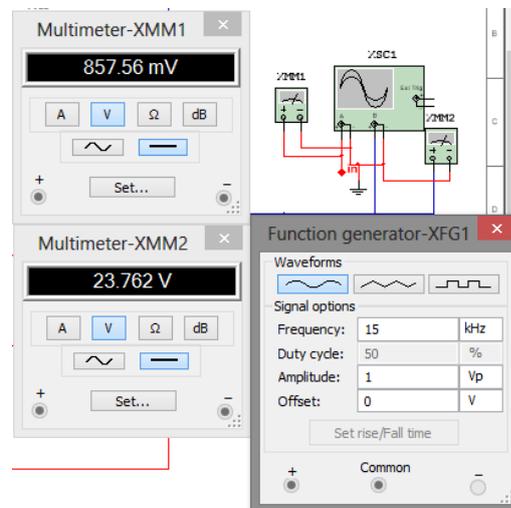
$$XCz = 106.103 \Omega$$

$$Zz = 10 + j106.103 \Omega$$

$$Zl = 4 \Omega$$

Cabe destacar que la impedancia varía de acuerdo a la frecuencia de entrada.

Las mediciones realizadas en la entrada y en la carga muestran los siguientes datos:



**Figura 53.** Medición de entrada y salida de voltaje

**Elaborado por:** Investigadora.

### 3.2.5. Diseño del preamplificador de audio

Para el diseño del preamplificador de audio se tomaron en cuenta los terminales requeridos en la parte externa del amplificador, debido a que de acuerdo a estas se requiere una adecuación de la señal, por lo cual se seleccionó como entradas un conector Cannon o XLR y una antena receptora como se muestra en la figura 54.

El conector XLR fue seleccionado pues es el conector balanceado más empleado en la industria del audio profesional, en la figura 54 se lo representó por medio de sus tres pines, en la cuales se asignaron respectivamente las señales en fase, contrafase y tierra.



$$RV1 = 2.35k\Omega$$

$$RV1 \approx 2.2k\Omega$$

$$RV2 = \frac{Rf}{3} \quad (52)$$

$$RV2 = \frac{4.7k\Omega}{3}$$

$$RV2 = 1.57k\Omega$$

$$RV2 \approx 1.5k\Omega$$

La ganancia que proporcionó el preamplificador está dada por una configuración no inversora del OPAM empleado.

$$G = 1 + \frac{4.7 k\Omega}{2.2 k\Omega} \quad (53)$$

$$G = 2.13 \approx 2$$

### 3.2.6. Crossover YLY-2088

El crossover seleccionado se caracteriza por ser pasivo, lo cual permite que este no genere ruido o distorsiones que pueden afectar el desempeño del sistema de amplificación.

Las frecuencias de corte se las menciona en los siguientes cálculos:

- **Filtro pasa bajo**

La salida del filtro pasa bajo se conecta directamente al woofer de la caja amplificada por lo cual es fundamental conocer la frecuencia de corte que posee el filtro, para comprobar que el rango de frecuencias en el que trabaja se mantenga dentro del rango útil de reproducción del woofer, el cual está alrededor de 40 a 2000 Hz.

Del crossover YLY-2088 se conoce que:

$$L = 270 \mu H$$

$$C1 = 100 \mu F$$

Datos que permiten calcular la frecuencia de corte a través de la siguiente fórmula:

$$f_{c1} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC1}} \quad (54)$$

$$f_{c1} = \frac{1}{2\pi\sqrt{(270 \times 10^{-6})(100 \times 10^{-6})}}$$

$$f_{c1} = 968,59 \text{ Hz}$$

Debido a que la frecuencia de corte se encuentra dentro del rango útil de woofer, los puentes del crossover se mantienen.

Además se puede comprobar la respuesta del filtro LC, ya que en frecuencias bajas requiere una inductancia baja y una capacitancia alta.

- **Filtro pasa alto**

De la misma forma que en el woofer, se conserva la conexión directa desde el crossover hacia el driver, para lo cual a continuación se comprueba la frecuencia de corte que posee el crossover.

$$L = 270 \mu H$$

$$C2 = 3.3 \mu F$$

$$C3 = 1.5 \mu F$$

Datos que permiten calcular la frecuencia de corte a través de la siguiente fórmula:

$$f_{c2} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC^2}} \quad (55)$$

$$f_{c2} = \frac{1}{2\pi\sqrt{(270 \times 10^{-6})(3.3 \times 10^{-6})}}$$

$$f_{c2} = 5.332 \text{ kHz}$$

Y

$$f_{c3} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC^2}} \quad (56)$$

$$f_{c3} = \frac{1}{2\pi\sqrt{(270 \times 10^{-6})(1.5 \times 10^{-6})}}$$

$$f_{c3} = 7.908 \text{ kHz}$$

De los valores obtenidos se comprobó que las frecuencias de corte están dentro del rango útil del driver, ya que el mismo se encuentra aproximadamente entre 4500 a 20000 Hz.

### **3.2.7. Desarrollo y corrección de errores del prototipo del sistema de amplificación de alta calidad con transmisión inalámbrica de audio empleando el protocolo PurePath Wireless**

Para la implementación de las placas de amplificador de audio diseñado en el apartado 3.1.1, se optó por PCB's en fibra de vidrio por las características que posee, teniendo en cuenta la calidad que ofrece además de su resistencia mecánica y aislamiento, además de su alta inmunidad al ruido. Adicionalmente, esta poseerá una sola capa debido a que el diseño y tamaño del mismo no requiere doble capa.

El diseño de la placa se lo muestra en la figura 55, el cual es un circuito impreso en negativo de 7.4 x 18.4 cm, además se muestran los diagramas del circuito esquemático



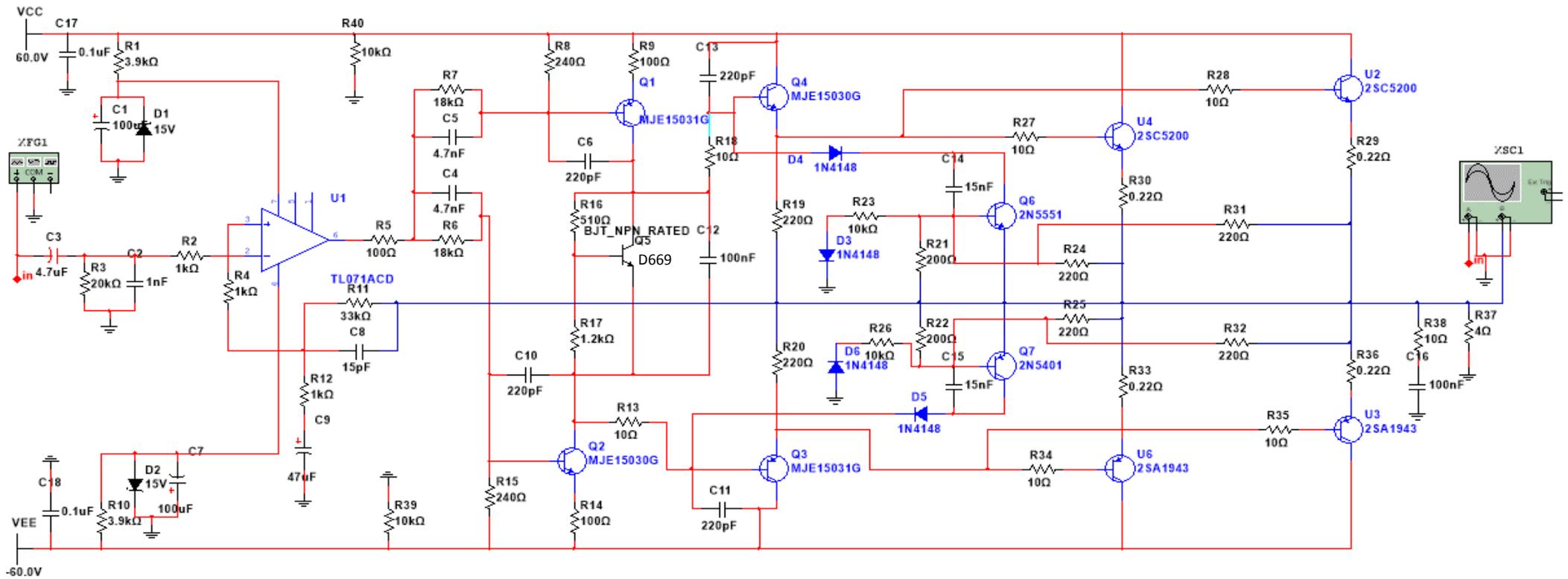


Figura 57. Diagrama esquemático del amplificador

Elaborado por: Investigadora

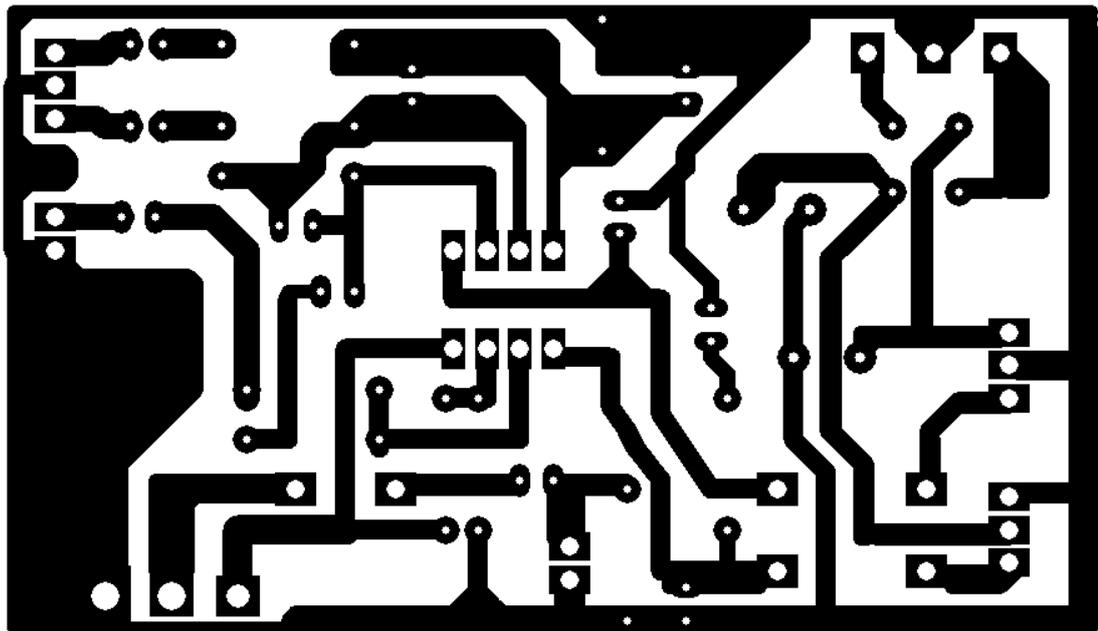
Cabe destacar que por los materiales disponibles se ha optado por emplear reemplazos como se muestra en la tabla a continuación, para lo cual se adjuntan datasheet en el apartado de anexos.

**Tabla 35.** Reemplazos de elementos empleados en el amplificador de audio

<b>ELEMENTO</b>	<b>REEMPLAZO</b>
MJE15031G	3DD13009
MJE15030G	2SA940

**Elaborado por:** Investigadora

La implementación del preamplificador se llevó a cabo de acuerdo al diseño del apartado 3.1.2, en las figuras 58, 59 y 60 se muestra el circuito impreso, además de los diagramas de circuito pictórico y esquemático.



**Figura 58.** Circuito Impreso del preamplificador.

**Elaborado por:** Investigadora

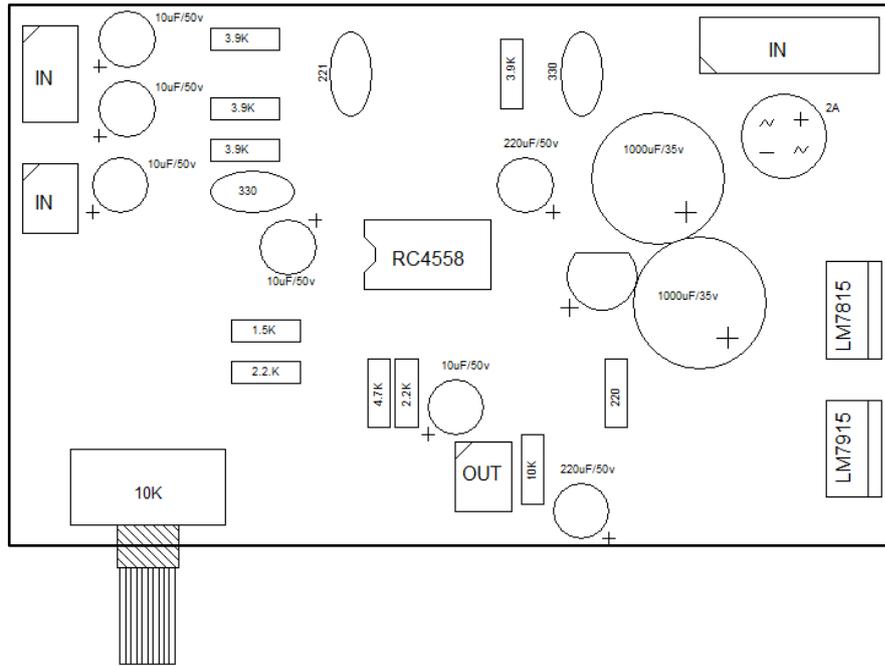


Figura 59. Esquema pictórico del preamplificador.

Elaborado por: Investigadora

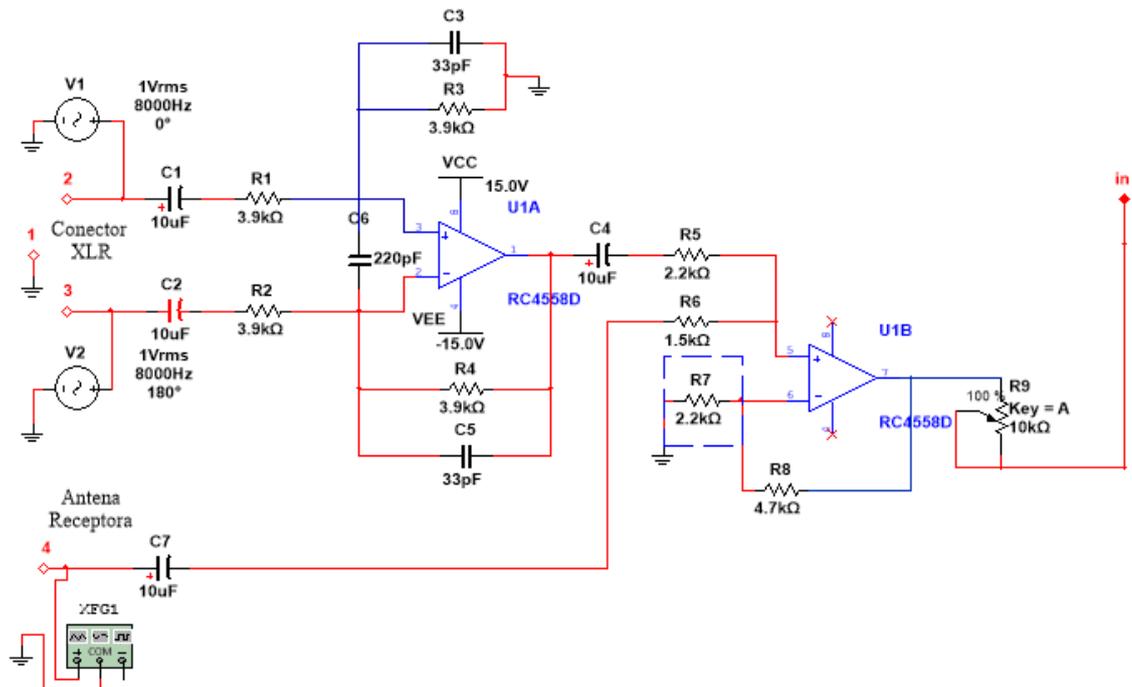


Figura 60. Diagrama esquemático del preamplificador

Elaborado por: Investigadora

### **3.2.8. Configuración del dispositivo transmisor y receptor con tecnología PurePath Wireless**

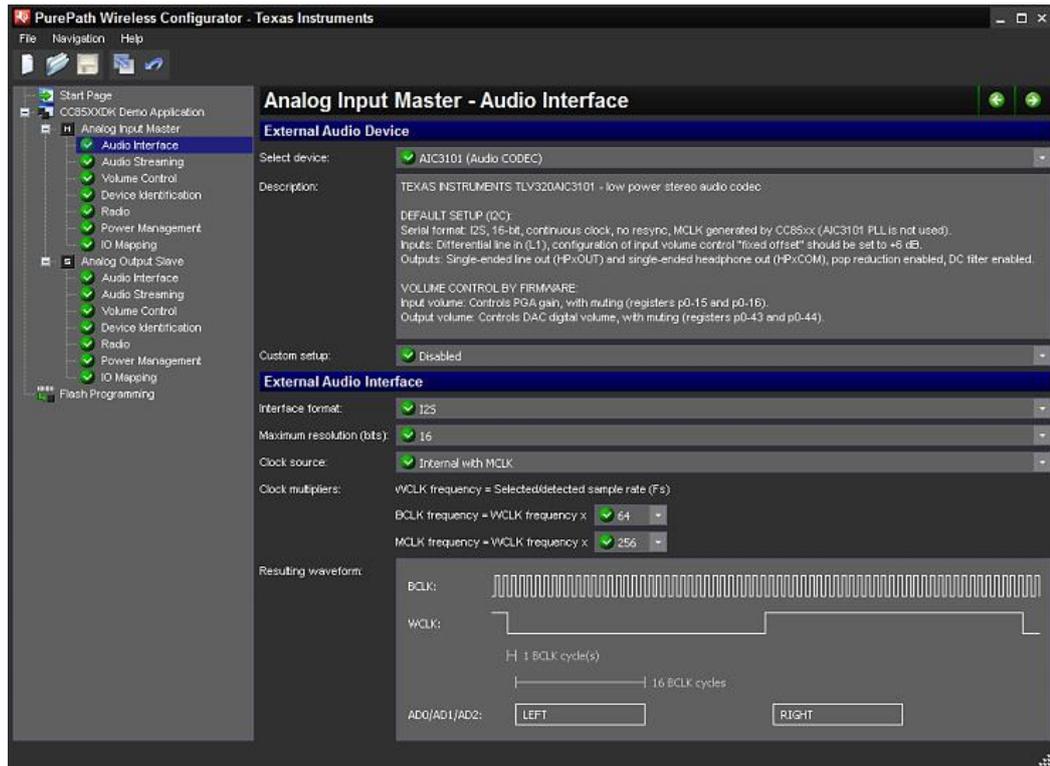
Para realizar la configuración de cada una de las placas requeridas para la transmisión inalámbrica de audio es necesario tener en cuenta que el kit seleccionado incluye un debugger para crear el firmware de acuerdo a las configuraciones y requerimientos del usuario en el que se incluyen características como:

- Interfaz de audio.
- Streaming de audio.
- Control de volumen.
- Identificación del dispositivo.
- Mapeo de entradas y salidas.
- Interfaz de usuario.
- Administración de energía.
- Interfaz de radio.
- Estado de placa.

#### **Configurador de PurePath Wireless**

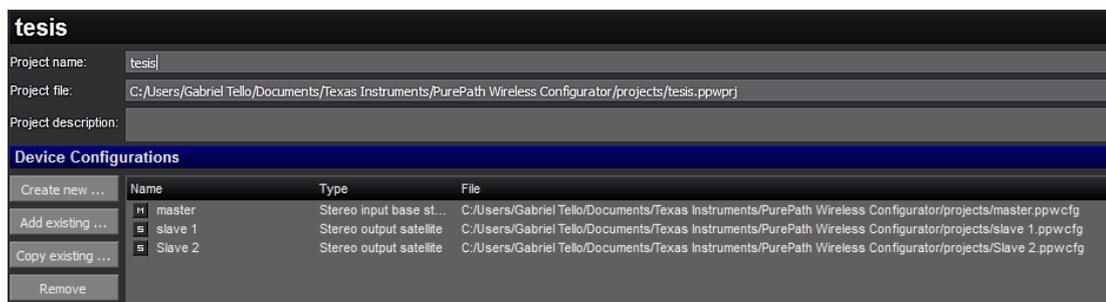
Es una herramienta de configuración que se basa en la conexión con una computadora, se la emplea para determinar la funcionalidad deseada y los parámetros que se desean establecer en la aplicación. El producto del debugger es generar imágenes de firmware que posteriormente se incorporan a los CC85XX de las placas con la tecnología PurePath Wireless. [13].

El configurador posee una interfaz amigable con el usuario como se puede observar en la figura 61:



**Figura 61.** Interfaz de PurePath Wireless Configurator. [25]

La descarga del software PurePath Wireless Configurator se la realiza por medio de la página oficial de Texas Instrument. Una vez instalado el programa mencionado anteriormente, se requiere comprobar si se encuentran actualizados los drivers de CC Debugger, para que de esta forma el software reconozca la tarjeta conectada. Una vez abierto el programa es necesario crear el proyecto, y los dispositivos a utilizar para la transmisión inalámbrica del audio como se muestra en la figura 62:

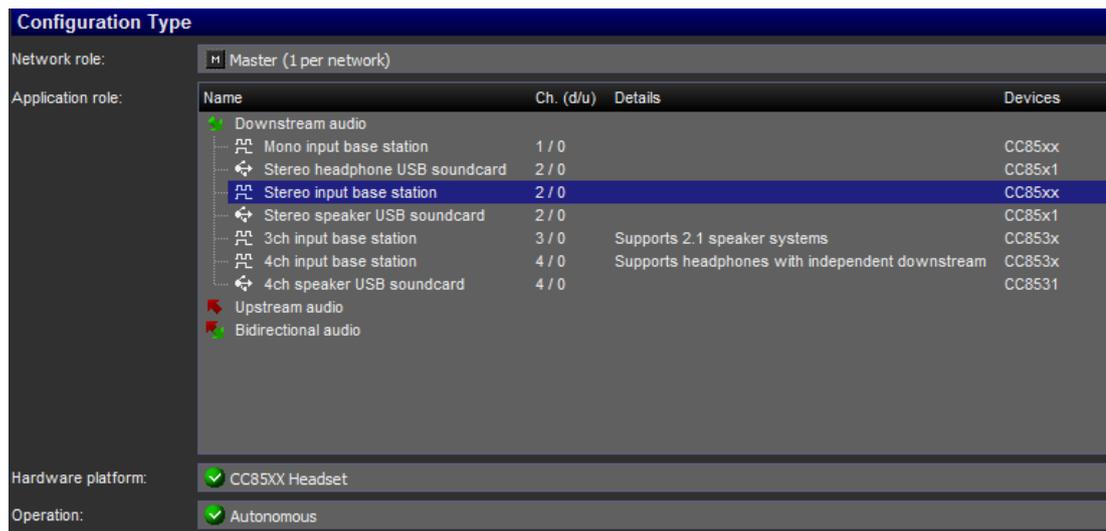


**Figura 62.** Creación de proyecto.

**Elaborado por:** Investigadora

Para la configuración de los dispositivos es necesario definir el comportamiento como maestro o esclavo de la tarjeta, así como la aplicación, plataforma y modo de operación como se muestra en la figura 63.

Cabe destacar que la realización del presente proyecto de investigación se emplearon 3 tarjetas con SoC CC8531, 1 configurada como maestro y 2 como esclavos para poder tener una señal de derecha e izquierda independientes de conexiones que limiten la ubicación de los dispositivos de amplificación de audio.

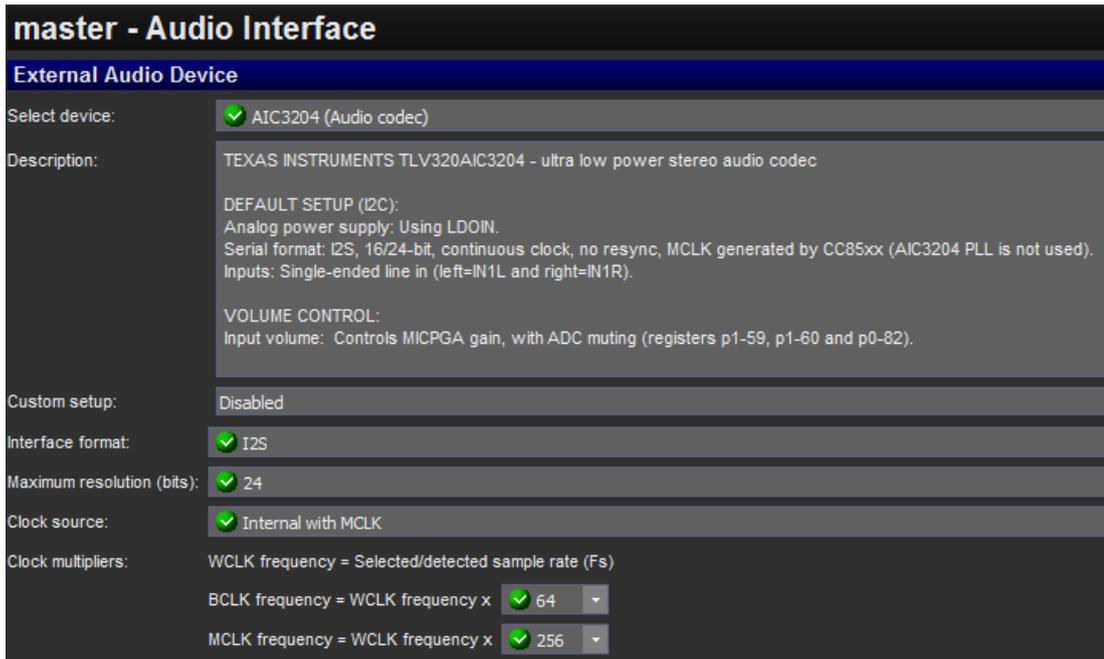


**Figura 63.** Configuración de red y aplicación de la tarjeta.

**Elaborado por:** Investigadora

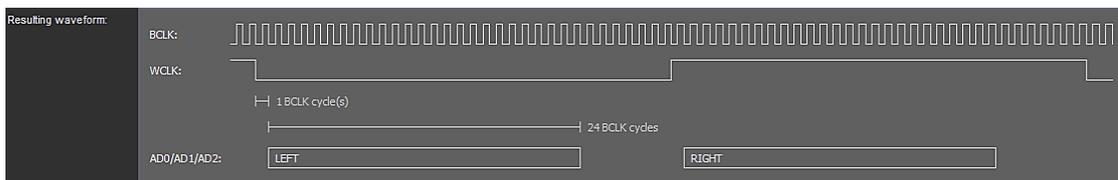
- **Configuración del dispositivo maestro**

Para la configuración del dispositivo con rol de Maestro dentro de la red, es necesario primeramente verificar el códec de audio que posee la tarjeta, en este caso es el AIC3204, además se configuró el formato de la interfaz para la transmisión de los datos, así como los bits de resolución o profundidad que en este caso se seleccionaron 24 bits. Los relojes para la sincronización de la transmisión se basan directamente al reloj interno de la placa como se muestra en la figura 64 y 65:



**Figura 64.** Interfaz de audio externa del maestro.

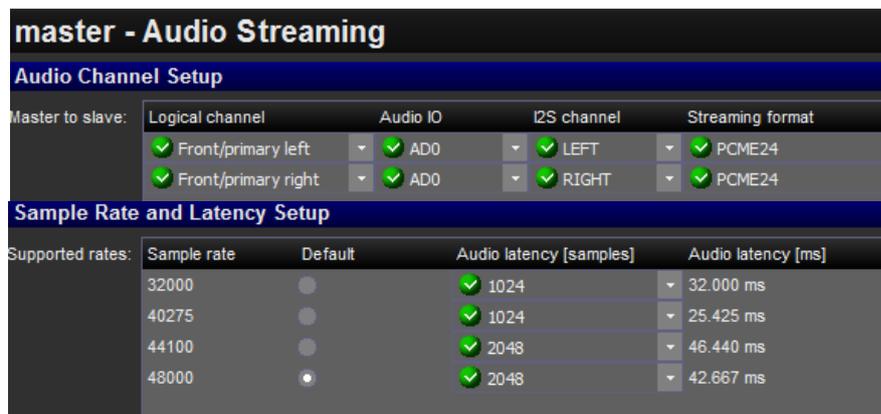
**Elaborado por:** Investigadora



**Figura 65.** Forma de onda para Interfaz de audio externa del maestro.

**Elaborado por:** Investigadora

La configuración de los parámetros para el streaming del audio son básicos para definir principalmente los canales y la frecuencia de muestreo:



**Figura 66.** Configuración de streaming del maestro.

**Elaborado por:** Investigadora

La identificación del dispositivo es necesaria para poder albergar dichos dispositivos en una misma red, y que puedan coexistir sin interferencia, por lo cual cada uno posee una ID distinta como se muestra en la figura 67.

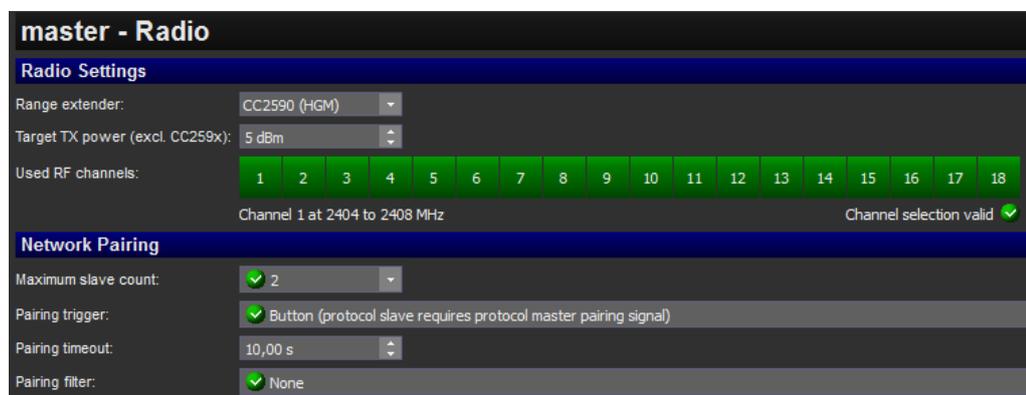
Estas direcciones se las puede añadir manualmente o permitir que sean reconocidas por medio del número de fábrica asignado.



**Figura 67.** Identificación de dispositivos.

**Elaborado por:** Investigadora

En el apartado de radio, se puede configurar al dispositivo para definir el número de esclavos de la red, así como la forma de interconexión entre los mismos para iniciar con la transmisión.

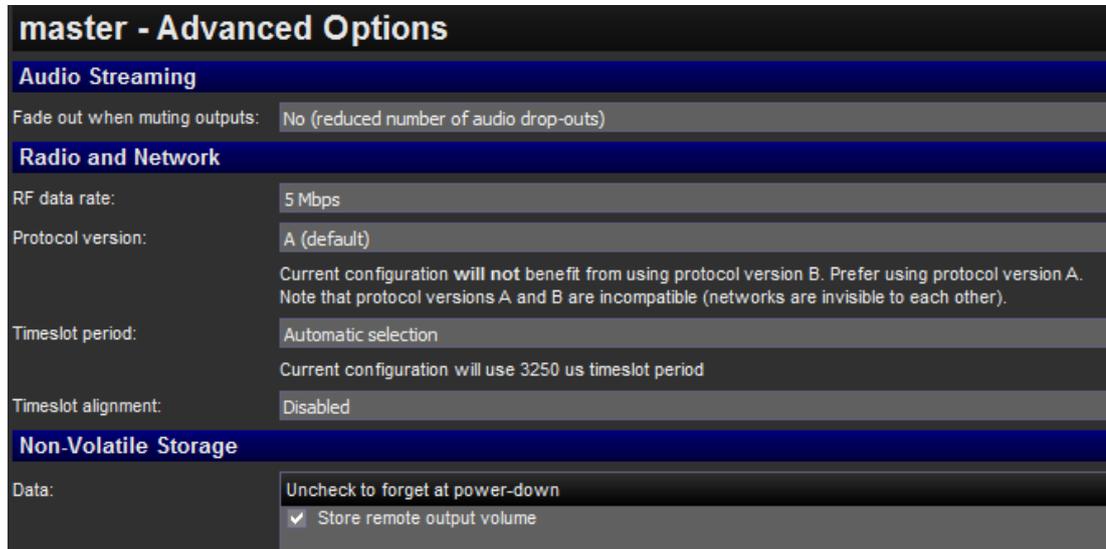


**Figura 68.** Asignación de esclavos.

**Elaborado por:** Investigadora

Las opciones avanzadas del dispositivo permite asignar la tasa de transmisión de los datos, entre las opciones se optó por 5 Mbps como se muestra en la figura 69.

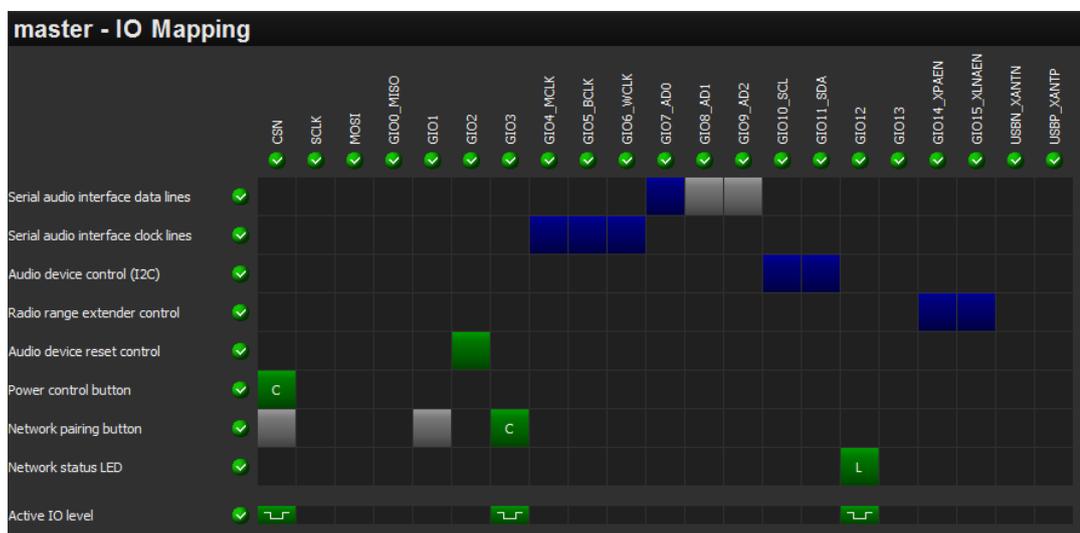
Entre otras opciones es necesario definir el comportamiento de la tarjeta cuando el audio perteneciente a la transmisión se desvanezca, permitiendo un mejor desenvolvimiento sin cortes.



**Figura 69.** Tasa de transmisión de datos.

**Elaborado por:** Investigadora

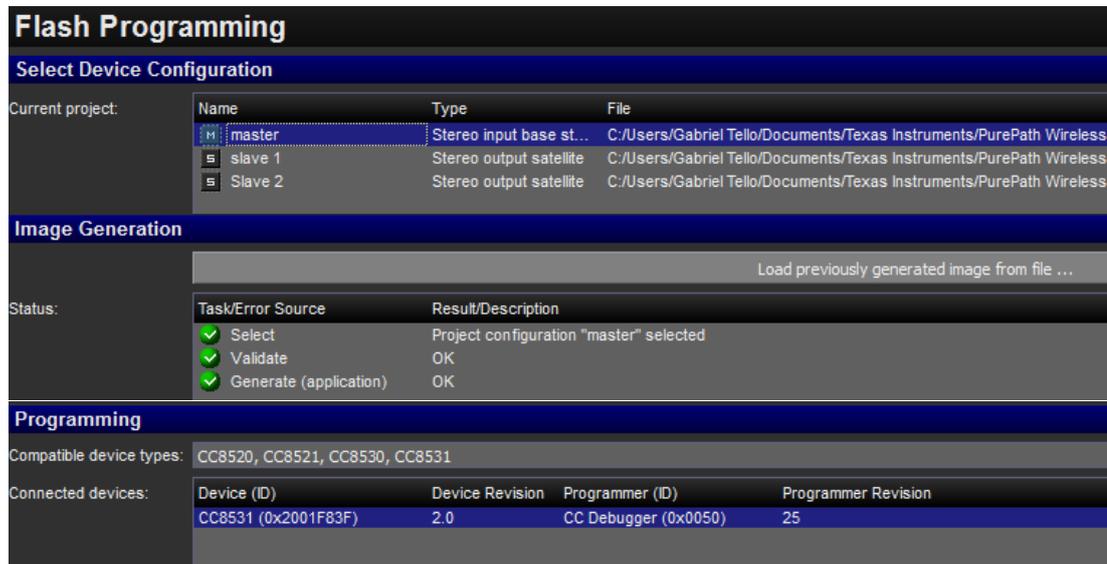
De acuerdo a las opciones seleccionadas anteriormente el mapeo de entradas y salidas varía, por lo cual fue necesario finalmente definir los mismos como se muestra en la figura 70:



**Figura 70.** Mapeo de puertos en dispositivo maestro.

**Elaborado por:** Investigadora

Finalmente, es necesario tener en cuenta la generación de la imagen, y comprobar la existencia de errores, además se debe comprobar el reconocimiento de la tarjeta.



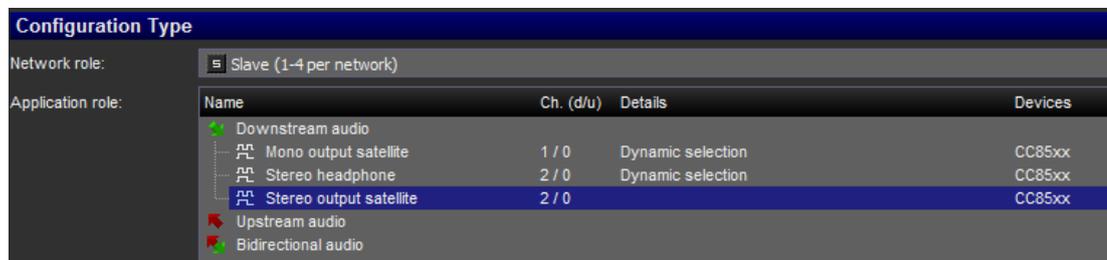
**Figura 71.** Generación de firmware para tarjeta maestro.

**Elaborado por:** Investigadora

- **Configuración de los dispositivos esclavos**

La configuración de los dispositivos como esclavos es semejante a la configuración de la tarjeta con rol maestro, como se muestra a continuación:

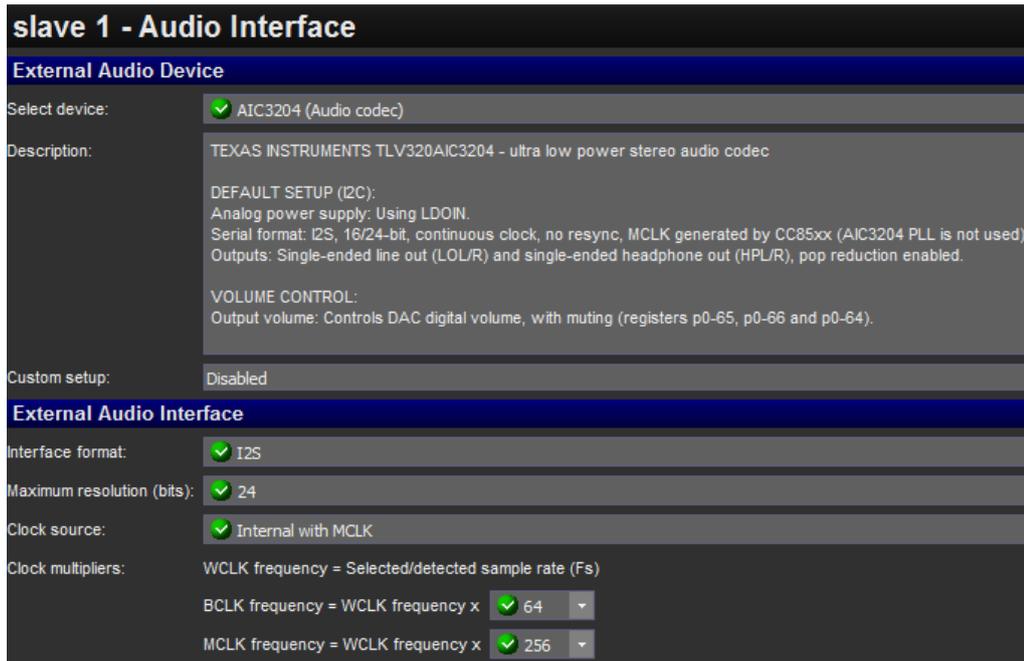
En primer lugar es necesario configurar el rol del dispositivo en la red:



**Figura 72.** Configuración del dispositivo esclavo.

**Elaborado por:** Investigadora

La configuración de la interfaz de audio se mantiene de acuerdo a los parámetros establecidos previamente en el maestro como se muestra en la figura 73:



**Figura 73.** Interfaz de audio del dispositivo esclavo.

**Elaborado por:** Investigadora

Los canales lógicos son configurados de acuerdo a la entrada en el maestro para lo cual es necesario respetar el nombre y lado de reproducción del sonido.



**Figura 74.** Streaming del audio en el dispositivo esclavo.

**Elaborado por:** Investigadora

La identificación de cada uno de los dispositivos esclavos se la mantiene de acuerdo a la configuración establecida en la tarjeta maestro.

Finalmente es necesario realizar el mapeo de las entradas y salidas de acuerdo a la selección previamente realizada.

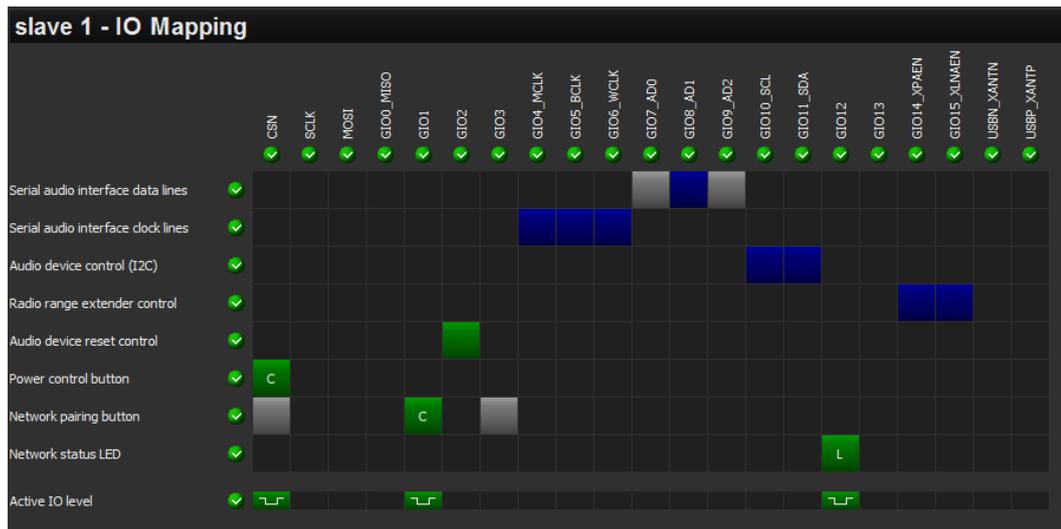


Figura 75. Mapeo de puertos en dispositivo esclavo 1.

Elaborado por: Investigadora

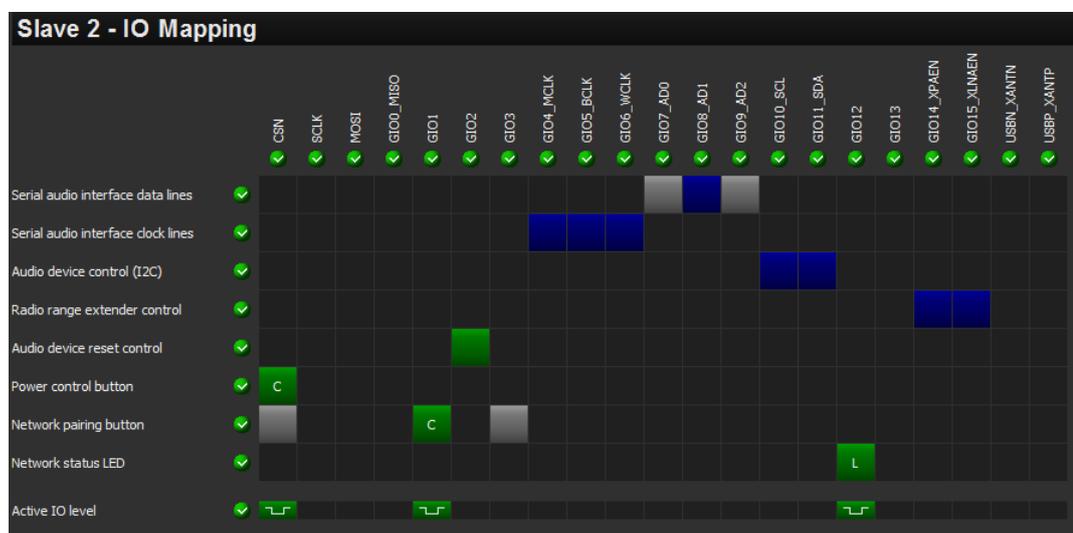


Figura 76. Mapeo de puertos en dispositivo esclavo 2.

Elaborado por: Investigadora

La selección de la frecuencia de muestreo se basó en el teorema de Nyquist, el mismo que menciona que la reconstrucción exacta de una señal continua a partir de sus muestras, es matemáticamente posible si la señal está limitada en banda y la tasa de muestreo es superior al doble de su ancho de banda.

El ancho de banda de una señal audible viene limitado por las frecuencias que es capaz de escuchar una persona las mismas que vienen dadas en el rango de 20 Hz a 20 kHz. Es importante recalcar que las personas adultas en el caso ideal escuchan hasta 15 kHz.

$$AB = 20 \text{ kHz}$$

Al ancho de banda se le añade un 10% adicional dando un total de:

$$AB + 10\% = 22 \text{ kHz} \quad (57)$$

Aplicando el teorema de Nyquist:

$$\begin{aligned} fm &\geq 2fs & (58) \\ fm &\geq 2 (22\text{kHz}) \\ fm &\geq 44 \text{ kHz} \end{aligned}$$

No obstante, la reconstrucción de la señal de audio se da con mayor calidad al muestrearla a 48 kHz.

De la misma forma se seleccionó como profundidad de bits el valor de 24, debido que de esta forma la señal de audio tendrá un mayor rango dinámico, teniendo en cuenta que este viene dado por el máximo y el mínimo valor en decibelios que una señal puede tener en la grabación, por lo tanto las distintas amplitudes de la onda sonora a transmitir vienen representados por el siguiente número de niveles:

$$2^n - 1 = 2^{24} - 1 = 16777215 \quad (59)$$

Al tener un gran número de niveles con el que se puede representar una amplitud de una señal, es posible que la onda de salida se reproduzca de forma muy similar a la onda de entrada, lo que contribuye directamente a la fidelidad y calidad que va a poseer la señal de audio, sin embargo es necesario tener en cuenta el soporte físico que se tendrá para la reproducción del sonido, pues no todos los reproductores de audio permiten reconocer la calidad de audio, otra de las limitaciones que se presenta al tratar de percibir una señal de audio de calidad viene directamente del oído humano como se mencionó anteriormente.

A pesar, de que la calidad de CD viene dado a 16 bits y 44.1 kHz, es recomendable que para tener una mejor calidad de audio se lo realice a 24 bits y 48 kHz.

### 3.2.9. Presupuesto

El presupuesto para llevar a cabo la implementación del sistema de amplificación HI-RES con transmisión inalámbrica de audio empleando el protocolo PurePath Wireless está conformado por costo de diseño y construcción.

El costo de diseño va ligado al salario básico de un Ingeniero en Electrónica y Comunicaciones en el país, el cual está determinado por el Ministerio de Trabajo y posee un valor de \$858,00 al mes. [29]

Al considerar un promedio de 21 días laborables al año, el salario diario está dado por:

$$\text{Salario diario} = \frac{\text{Salario mensual}}{\text{Días laborables}} \quad (60)$$

$$\text{Salario diario} = \frac{358}{21}$$

$$\text{Salario diario} = \$ 40,86$$

Para obtener la remuneración por hora de trabajo es necesario realizar el siguiente cálculo:

$$\text{Salario por hora} = \frac{\text{Salario diario}}{\text{Horas laborables}} \quad (61)$$

$$\text{Salario por hora} = \frac{40,86}{8}$$

$$\text{Salario por hora} = \$ 5,11$$

De acuerdo a las horas empleadas para el diseño del proyecto, incluyendo realización de simulaciones, y pruebas de funcionamiento, el costo de diseño está dado por.

$$\text{Costo de diseño} = \text{Horas de diseño} * \text{Salario por hora} \quad (62)$$

$$\text{Salario diario} = 300 * 5,11$$

$$\text{Salario diario} = \$ 1533,00$$

En la siguiente tabla se muestran los valores de los elementos empleados para la construcción del prototipo, cabe destacar que el sistema de amplificación consta de dos cajas amplificadas.

**Tabla 36.** Presupuesto de construcción del prototipo

<b>N°</b>	<b>Descripción</b>	<b>Unidad</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Valor Unitario</b>	<b>Valor Total</b>
1	Cajas amplificadas	c/u	2	150,00	150,00
2	Crossover	c/u	2	5,50	11,00
3	Dev Kit CC85XX	c/u	2	154,26	308,52
4	Componentes electrónicos	c/u	1	160,00	160,00
5	Baquelita fibra de vidrio	c/u	3	5,00	15,00
6	Cargadores 5V.	c/u	2	3,50	7,00
7	Impresiones en papel couché	c/u	5	1,40	7,00
8	Módulo Wi-Fi	c/u	2	8,00	16,00
9	Perillas para potenciómetro	c/u	2	0,40	0,80
10	Conectores 120V.	c/u	2	3,00	6,00
11	Conectores XLR	c/u	2	0,75	1,50
12	Disipador	c/u	2	15,00	30,00
13	Transformador	c/u	2	60,00	120,00
14	Placas de aluminio	c/u	2	20,00	40,00
15	Lana de roca	Rollo	1/2	8,30	8,30
Subtotal					881,12
IVA (12%)					105,73
Total					986,85
Imprevistos (3%)					29,61
<b>TOTAL</b>					<b>1016,46</b>

**Elaborado por:** Investigadora

Por último, para conocer el costo total de implementación del prototipo es necesario considerar la siguiente tabla:

**Tabla 37.** Presupuesto Total

<b>N°</b>	<b>Descripción</b>	<b>Unidad</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Valor Unitario</b>	<b>Valor Total</b>
<b>1</b>	Costo de diseño	c/u	1	1533,00	1533,00
<b>2</b>	Costo de construcción	c/u	1	1016,46	1016,46
<b>TOTAL</b>					2549.46

**Elaborado por:** Investigadora

El costo más elevado es el costo de diseño por el tipo de arquitectura que se maneja dentro del prototipo, sin embargo al considerar una producción en línea este valor disminuirá ya que se dispondrá del diseño, y bastará con la construcción del sistema de amplificación.

## CAPÍTULO IV

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 4.1. Conclusiones

- La eficiencia de un amplificador, así como su ganancia y calidad de audio se relaciona directamente con la arquitectura del amplificador, así como la fuente de alimentación del mismo, pues necesario tener en cuenta que una señal de audio es considerada como una señal débil y poco inmune al ruido y distorsión.
- El análisis de aplicabilidad de cada uno de los protocolos inalámbricos existentes permitió comparar parámetros fundamentales en la transmisión de audio, lo que conllevó a comprobar que la tecnología PurePath Wireless es la más adecuada para dispositivos de sonido, pues fue desarrollada por Texas Instruments específicamente para audio. Es primordial conocer que en la actualidad el protocolo más empleado para la transmisión de audio es Bluetooth, sin embargo este presenta muchos inconvenientes en cuanto a compresión de audio, lo que conlleva a la pérdida de calidad, e incluso se considera que el ancho de banda que dispone es relativamente pequeño, pues maneja 2 Mbps, por lo cual se considera a las tarjetas con tecnología PurePath Wireless la mejor opción, ya que entregan audio sin compresión a 5Mbps, permitiendo de esta forma mantener la calidad de audio.
- El adecuado diseño del sistema de amplificación, permitió obtener valores de salida en los que se pudo verificar la ganancia del amplificador, a pesar de que el diseño propuesto idealmente posee una ganancia de 33, en la implementación se obtuvo una ganancia de 30, por lo cual al tratarse con elementos no ideales, los

parámetros de la simulación tuvieron ajustes que cambiaron la respuesta del amplificador sin afectar la calidad de audio.

- El dimensionamiento de componentes electrónicos va ligado a la disponibilidad de los equipos como cajas amplificadas, pues es necesario tener en cuenta un sobredimensionamiento tanto para la amplificación de frecuencias bajas como altas para evitar daños en dichos dispositivos.
- La arquitectura del amplificador seleccionada, se basó en la calidad de audio que maneja la clase AB, teniendo en cuenta que aunque la eficiencia no sea un valor superior al 60% ofrece una alta fidelidad y robustez, además de pocas pérdidas al manejar una señal de audio.
- El rango de cobertura que poseen las tarjetas con tecnología PurePath Wireless cumplen con las especificaciones dadas por el fabricante, pues al realizar las mediciones con línea de vista directa como sin línea de vista directa se obtuvo una transmisión sin cortes de hasta 67,928m y 42,249m en el primer y segundo caso respectivamente, a partir de las distancias mencionadas la transmisión de audio tiene intermitencias.
- En base al diseño propuesto y la investigación realizada de la arquitectura de cajas amplificadas, se puede concluir que el crossover juega un papel fundamental en el desempeño del amplificador, pues al emplear un crossover activo este se ubica a continuación del preamplificador, sin embargo al emplear un crossover pasivo se lo ubica a la salida del amplificador de audio, teniendo en cuenta que un crossover pasivo no genera ruido en el amplificador.
- Las pruebas de funcionamiento en lo referente a transmisión y recepción de audio se realizaron empleando canciones con formatos que cumplen con los estándares requerido, pues es necesario considerar que el audio no tenga compresión y su calidad este dentro de los parámetros en los cuales la tarjeta pueda desempeñar su labor eficientemente, por lo cual se concluye que los formatos óptimos para la comunicación inalámbrica se rige a una resolución de 24 bits con una frecuencia de muestreo de 48 kHz.
- La toma de muestras de señales empleando diversas técnicas para comprobar el correcto funcionamiento tanto del amplificador como de la transmisión inalámbrica de audio, se realizó a través de señales de ruido rosa y ruido blanco, pues estos genera frecuencias dentro del rango audible de 20 – 20000 Hz, con

variaciones en la densidad de potencia por cada frecuencia, no obstante al obtener señales en fase se puede decir que la transmisión es adecuada en términos de latencia, y la amplitud que muestra la señal de entrada como de salida verifican la funcionalidad del dispositivo en términos de potencia.

#### **4.2. Recomendaciones**

- Debido a que el audio se considera como una señal débil por el valor de amplitud que maneja en voltios, es necesario aislarla del ruido externo, por lo cual se recomienda el uso de cables apantallados.
- Para evitar el sobrecalentamiento del amplificador se puede optar por utilizar ventilación forzada, además se puede verificar la posibilidad de emplear un disipador de mayor área, o en su defecto emplear un disipador de cobre, sin embargo el costo que posee el mismo genera un aumento considerable en la fabricación del módulo, además no son fácilmente encontrados en el sector comercial.
- Tomar en cuenta la potencia tanto del woofer como del driver, pues el diseño en el ámbito de potencia debe estar regido a dicha potencia, teniendo en cuenta que a mayor frecuencia va a existir menor potencia, además es fundamental conocer la calidad de los mismo, pues de ella depende el sonido y las frecuencias que se puedan reproducir a través de cada uno de ellos.

## MATERIALES DE REFERENCIA

### Referencias Bibliográficas

- [1] J. ANTORÁN, «TALLER DE INTRODUCCIÓN A LOS AMPLIFICADORES DE AUDIO,» 2017. [En línea]. Available: [http://sites.ieee.org/sb-unizar/files/2017/02/Presentacion\\_amp.pdf](http://sites.ieee.org/sb-unizar/files/2017/02/Presentacion_amp.pdf). [Último acceso: 27 04 2019].
- [2] UNIVERSIDAD DE OVIEDO, «AMPLIFICACIÓN,» [En línea]. Available: [https://www.unioviado.es/ate/alberto/TEMA\\_3\\_Amplificacion\\_Telem.pdf](https://www.unioviado.es/ate/alberto/TEMA_3_Amplificacion_Telem.pdf). [Último acceso: 27 04 2019].
- [3] J. SALGADO, «AMPLIFICADORES,» [En línea]. Available: <http://www.ele-mariamoliner.dyndns.org/~jsalgado/analogica/amplificadores8-5b.pdf>. [Último acceso: 27 04 2019].
- [4] G. SERRANO y J. J. PÉREZ, «DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN AMPLIFICADOR DE AUDIO EN CALSE AB EN PUENTE DE BAJA POTENCIA,» 2015. [En línea]. Available: [https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/49739/TFG%20Guillermo%20Serrano\\_14043773524451290228322987736355.pdf?sequence=2](https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/49739/TFG%20Guillermo%20Serrano_14043773524451290228322987736355.pdf?sequence=2). [Último acceso: 25 04 2019].
- [5] G. CHIRIBOGA, «DISEÑO E IMPLEMENTACION DE UN AMPLIFICADOR DE AUDIO CLASE D, MONOFÓNICO, DE 100W,» 2015. [En línea]. Available:

- <http://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/10327/3/CD-6155.pdf>. [Último acceso: 25 04 2019].
- [6] «CLASES DE AMPLIFICADORES DE POTENCIA,» 2018. [En línea]. Available: <http://www.geocities.ws/tlalocman18/clasamp.html>. [Último acceso: 27 04 2019].
- [7] A. ZORZANO, «AMPLIFICADOR DE AUDIO DE ALTA FIDELIDAD PARA SISTEMAS ACTIVOS DE ALTA VOCES CON BAJO CONSUMO DE ENERGÍA,» 2004. [En línea]. Available: <https://dialnet.unirioja.es/descarga/tesis/20788.pdf>. [Último acceso: 29 04 2019].
- [8] E. LASTRA, «AMPLIFICADOR DE 4 WATTS DE POTENCIA DE SATURACION PARA APLICACIONES UWB,» 04 2015. [En línea]. Available: <https://repositorio.unican.es/xmlui/bitstream/handle/10902/6960/377188.pdf?sequence=1>. [Último acceso: 27 04 2019].
- [9] C. Castro, «DESARROLLO DE UN PROTOTIPO PRE-INDUSTRIAL DE COMUNICACIÓN PARA LA TRANSMISIÓN INALÁMBRICA DE AUDIO DIGITAL PARA INSTRUMENTOS MUSICALES,» 23 01 2013. [En línea]. Available: <https://repositorio.uniandes.edu.co/bitstream/handle/1992/25145/u627845.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. [Último acceso: 23 04 2019].
- [10] F. Miyara, «CONVERSORES D/A Y A/D,» 2004. [En línea]. Available: <https://www.fceia.unr.edu.ar/enica3/da-ad.pdf>. [Último acceso: 09 05 2019].
- [11] SERBAL, «MUESTREO DIGITAL,» [En línea]. Available: <http://serbal.pntic.mec.es/srug0007/archivos/radiocomunicaciones/3%20SE%20DIALES%20DIGITALES/Muestreo%20digital.pdf>. [Último acceso: 09 04 2019].

- [12] UNIVERSIDAD NACIONAL DE CUYO, «MUESTREO DIGITAL,» [En línea]. Available: <http://fing.uncu.edu.ar/catedras/industrial/electronica/archivos/electronica/tema7r.pdf>. [Último acceso: 09 05 2019].
- [13] D. Hernandez, I. Flores y R. Torres, «SISTEMA INALÁMBRICO DE TRANSMISIÓN DE AUDIO CON APLICACIÓN A DOMÓTICA,» 12 2012. [En línea]. Available: <https://tesis.ipn.mx/bitstream/handle/123456789/13665/SISTEMA%20INALAMBRICO%20DE%20TRANSMISION%20DE%20AUDIO%20CON%20APLICACION%20A%20DOMOTICA.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. [Último acceso: 23 04 2019].
- [14] G. Quesada, M. Roman, R. Delgado, A. Conesa, M. Bonell y A. Rojas, «Mejoras en el Consumo de Energía de los Transductores de Corriente Basados en el Efecto Flux-Gate,» 06 2014. [En línea]. Available: [https://www.researchgate.net/publication/263512036\\_Mejoras\\_en\\_el\\_Consumo\\_de\\_Energia\\_de\\_los\\_Transductores\\_de\\_Corriente\\_Basados\\_en\\_el\\_Efecto\\_Flux-Gate/download](https://www.researchgate.net/publication/263512036_Mejoras_en_el_Consumo_de_Energia_de_los_Transductores_de_Corriente_Basados_en_el_Efecto_Flux-Gate/download). [Último acceso: 09 05 2019].
- [15] TEXAS INSTRUMENT, «PurePath™ Wireless 2.4 GHz RF SoC for wireless digital audio streaming,» [En línea]. Available: [http://www.ti.com/product/CC8530?fbclid=IwAR0HB\\_MSZW\\_5kZk0ERSzhWgF06jirplhU8Nepi7Z-9kdJ\\_7i5fxxlaHOtX4](http://www.ti.com/product/CC8530?fbclid=IwAR0HB_MSZW_5kZk0ERSzhWgF06jirplhU8Nepi7Z-9kdJ_7i5fxxlaHOtX4). [Último acceso: 26 04 2019].
- [16] TEXAS INSTRUMENT, «PUREPATH WIRELESS AUDIO,» [En línea]. Available: <http://www.ti.com/lit/ml/swab002/swab002.pdf>. [Último acceso: 11 05 2019].
- [17] SCEA, «EL SONIDO,» [En línea]. Available: <http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/276/A4.pdf?sequence=4>. [Último acceso: 10 05 2019].
- [18] M. Á. Caro, «HISTORIA DE LA GRABACIÓN SONORA: UNA APLICACIÓN DIDÁCTICA,» 09 2009. [En línea]. Available:

- <https://www.feandalucia.ccoo.es/docu/p5sd5494.pdf>. [Último acceso: 13 05 2019].
- [19] «HISTORIA DE LA GRABACIÓN Y REPRODUCCIÓN DEL SONIDO,» [En línea]. Available: <http://colegiohelicon.org/blogs/wp-content/blogs.dir/22/files/2012/10/HISTORIA-DE-LA-GRABACI%23U00c3%23U201cN-Y-REPRODUCI%23U00c3%23U201cN-DEL-SONIDO.ppt>. [Último acceso: 13 05 2019].
- [20] J. C. López, «La evolución del sonido en el cine a lo largo de los años,» 30 09 2014. [En línea]. Available: <https://www.xataka.com/audio/de-uno-a-64-altavoces-la-evolucion-del-sonido-en-el-cine-a-lo-largo-de-los-anos>. [Último acceso: 20 06 2019].
- [21] P. JARAMILLO, «DISEÑO Y DESARROLLO DE UN MÉTODO INTERACTIVO DE ENTRENAMIENTO AUDITIVO PARA ESTUDIANTES Y PROFESIONALES EN INGENIERÍA EN SONIDO Y ACÚSTICA,» 2012. [En línea]. Available: <http://dspace.udla.edu.ec/bitstream/33000/2658/1/UDLA-EC-TISA-2012-01%28S%29.pdf>. [Último acceso: 11 05 2019].
- [22] M. SALGADO, «ACUSTICA Y FUNDAMENTOS DEL SONIDO,» 12 2010. [En línea]. Available: [https://www.arauacustica.com/files/publicaciones\\_relacionados/pdf\\_esp\\_377.pdf](https://www.arauacustica.com/files/publicaciones_relacionados/pdf_esp_377.pdf). [Último acceso: 10 05 2019].
- [23] «TECNOLOGÍAS PARA LOS SISTEMAS MULTIMEDIA,» 2005. [En línea]. Available: <http://dis.um.es/~jfernand/0405/tsm/tema3.pdf>. [Último acceso: 10 05 2019].
- [24] UNEX, «EQUIPOS DE PROCESADO DE SEÑAL,» [En línea]. Available: [http://tsc.unex.es/~tabo/EA/EA\\_tema3\\_3\\_01\\_2h.pdf](http://tsc.unex.es/~tabo/EA/EA_tema3_3_01_2h.pdf). [Último acceso: 10 05 2019].

- [25] TEXAS INSTRUMENT, «CC85XXDK-HEADSET User's Guide,» [En línea]. Available: <http://www.ti.com/lit/ug/swru281/swru281.pdf>. [Último acceso: 11 05 2019].
- [26] Espix, «ILS - YLY-2088 400W Ajustable de 2 Maneras Crossover 2 Filtros Unidad de Altavoz de Audio Divisor de frecuencia Completa Gama de Agudos Bass,» 18 07 2019. [En línea]. Available: <https://www.amazon.es/ILs-YLY-2088-Ajustable-Crossover-frecuencia/dp/B07912DR5K>. [Último acceso: 15 11 2019].
- [27] Mundo Altavoces, «LA POTENCIA RMS VS POTENCIA PMPO VS POTENCIA ELÉCTRICA. ¿Cuál es la potencia que debemos mirar?,» 01 09 2018. [En línea]. Available: <https://mundoaltavoces.com/potencia-de-los-altavoces-potencia-rms-vs-potencia-pmpo-vs-potencia-electrica/>. [Último acceso: 25 11 2019].
- [28] N. Muiño, DISEÑO DE AMPLIFICADORES DE POTENCIA DE AUDIO, Buenos Aires: Prentice Hall, 2011.
- [29] Ministerio de Trabajo, «Salarios Mínimos Sectoriales,» 27 12 2018. [En línea]. Available: <http://www.trabajo.gob.ec/wp-content/uploads/2019/02/ACUERDO-MINISTERIAL-Nro.-MDT-2019-008-A-1.pdf>. [Último acceso: 02 12 2019].

## Anexos

- Anexo A: Datasheet MJE150XXG

# MJE15028, MJE15030 (NPN), MJE15029, MJE15031 (PNP)

## Complementary Silicon Plastic Power Transistors

These devices are designed for use as high-frequency drivers in audio amplifiers.

### Features

- High Current Gain – Bandwidth Product
- TO-220 Compact Package
- These Devices are Pb-Free and are RoHS Compliant\*

### MAXIMUM RATINGS

Rating	Symbol	Value	Unit
Collector-Emitter Voltage MJE15028G, MJE15029G MJE15030G, MJE15031G	$V_{CE0}$	120 150	Vdc
Collector-Base Voltage MJE15028G, MJE15029G MJE15030G, MJE15031G	$V_{CB}$	120 150	Vdc
Emitter-Base Voltage	$V_{EB}$	5.0	Vdc
Collector Current – Continuous	$I_C$	8.0	Adc
Collector Current – Peak	$I_{CM}$	16	Adc
Base Current	$I_B$	2.0	Adc
Total Device Dissipation @ $T_C = 25^\circ\text{C}$ Derate above $25^\circ\text{C}$	$P_D$	50 0.40	W W/ $^\circ\text{C}$
Total Device Dissipation @ $T_A = 25^\circ\text{C}$ Derate above $25^\circ\text{C}$	$P_D$	2.0 0.016	W W/ $^\circ\text{C}$
Operating and Storage Junction Temperature Range	$T_J, T_{stg}$	-65 to +150	$^\circ\text{C}$

Stresses exceeding those listed in the Maximum Ratings table may damage the device. If any of these limits are exceeded, device functionality should not be assumed, damage may occur and reliability may be affected.

### THERMAL CHARACTERISTICS

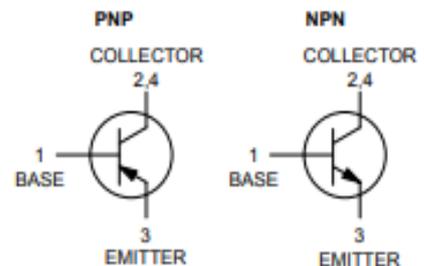
Characteristics	Symbol	Max	Unit
Thermal Resistance, Junction-to-Case	$R_{\theta JC}$	2.5	$^\circ\text{C/W}$
Thermal Resistance, Junction-to-Ambient	$R_{\theta JA}$	62.5	$^\circ\text{C/W}$



ON Semiconductor®

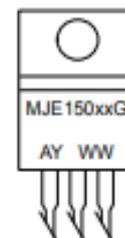
<http://onsemi.com>

**8 AMPERE  
POWER TRANSISTORS  
COMPLEMENTARY SILICON  
120-150 VOLTS, 50 WATTS**



TO-220  
CASE 221A  
STYLE 1

### MARKING DIAGRAM



• Anexo B: Datasheet 3DD13009 (Reemplazo del transistor MJE15030G)

isc Silicon NPN Power Transistor

3DD13009K

DESCRIPTION

- High breakdown voltage
- High switching speed
- High current capability
- Minimum Lot-to-Lot variations for robust device performance and reliable operation

APPLICATIONS

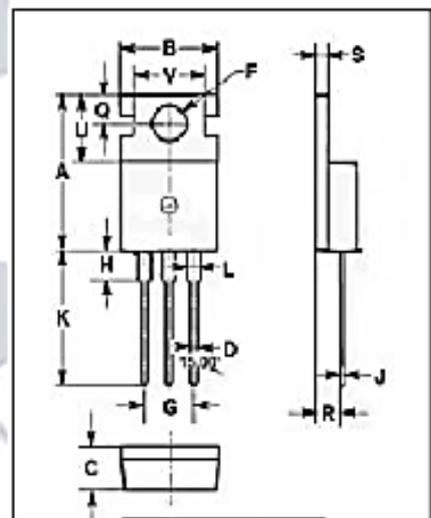
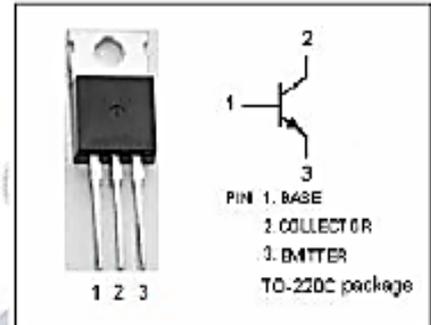
- Energy-saving light
- Electronic ballasts
- High frequency switching power supply
- High frequency power transform

ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS (T<sub>a</sub>=25°C)

SYMBOL	PARAMETER	VALUE	UNIT
V <sub>CEV</sub>	Collector-Emitter Voltage	70.0	V
V <sub>CEO</sub>	Collector-Emitter Voltage	40.0	V
V <sub>EBV</sub>	Emitter-Base Voltage	9	V
I <sub>C</sub>	Collector Current-Continuous	12	A
I <sub>CM</sub>	Collector Current-Peak	24	A
I <sub>B</sub>	Base Current	6	A
I <sub>BM</sub>	Base Current-Peak	12	A
P <sub>C</sub>	Collector Power Dissipation T <sub>c</sub> =25°C	1.00	W
T <sub>j</sub>	Junction Temperature	150	°C
T <sub>stg</sub>	Storage Temperature Range	-55-150	°C

THERMAL CHARACTERISTICS

SYMBOL	PARAMETER	MAX	UNIT
R <sub>θ(j-c)</sub>	Thermal Resistance, Junction to Case	1.25	°C/W
R <sub>θ(j-a)</sub>	Thermal Resistance, Junction to Ambient	62.5	°C/W



DIM	mm	
	MIN	MAX
A	15.50	15.90
B	9.80	10.20
C	4.20	4.50
D	0.70	0.90
F	3.40	3.70
G	4.98	5.18
H	2.48	2.90
J	0.44	0.60
K	12.80	13.40
L	1.20	1.45
Q	2.70	2.90
R	2.30	2.70
S	1.29	1.35
U	6.45	6.65
V	8.65	8.85

- Anexo C: Datasheet 2SA940 (Reemplazo del transistor MJE15031G)

**Silicon PNP Power Transistors**

**2SA940**

**DESCRIPTION**

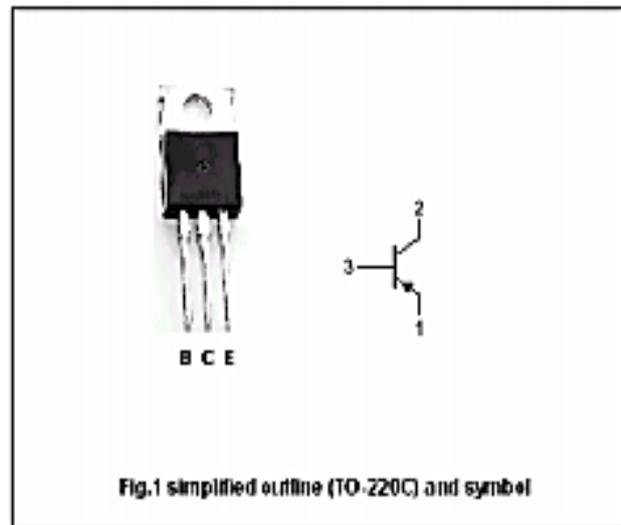
- With TO-220 package
- Complement to type 2SC2073

**APPLICATIONS**

- Power amplifier applications
- Vertical output applications

**PINNING**

PIN	DESCRIPTION
1	Emitter
2	Collector,connected to mounting base
3	Base



**Absolute maximum ratings (Ta=25 )**

SYMBOL	PARAMETER	CONDITIONS	VALUE	UNIT
$V_{CB0}$	Collector-base voltage	Open emitter	-150	V
$V_{CE0}$	Collector-emitter voltage	Open base	-150	V
$V_{EB0}$	Emitter-base voltage	Open collector	-5	V
$I_C$	Collector current (DC)		-1.5	A
$I_B$	Base current		-0.5	A
$P_C$	Collector power dissipation	$T_A=25$	1.5	W
		$T_C=25$	25	
$T_J$	Junction temperature		150	
$T_{stg}$	Storage temperature		-55-150	

- Anexo D: Puntos de medición del amplificador de audio

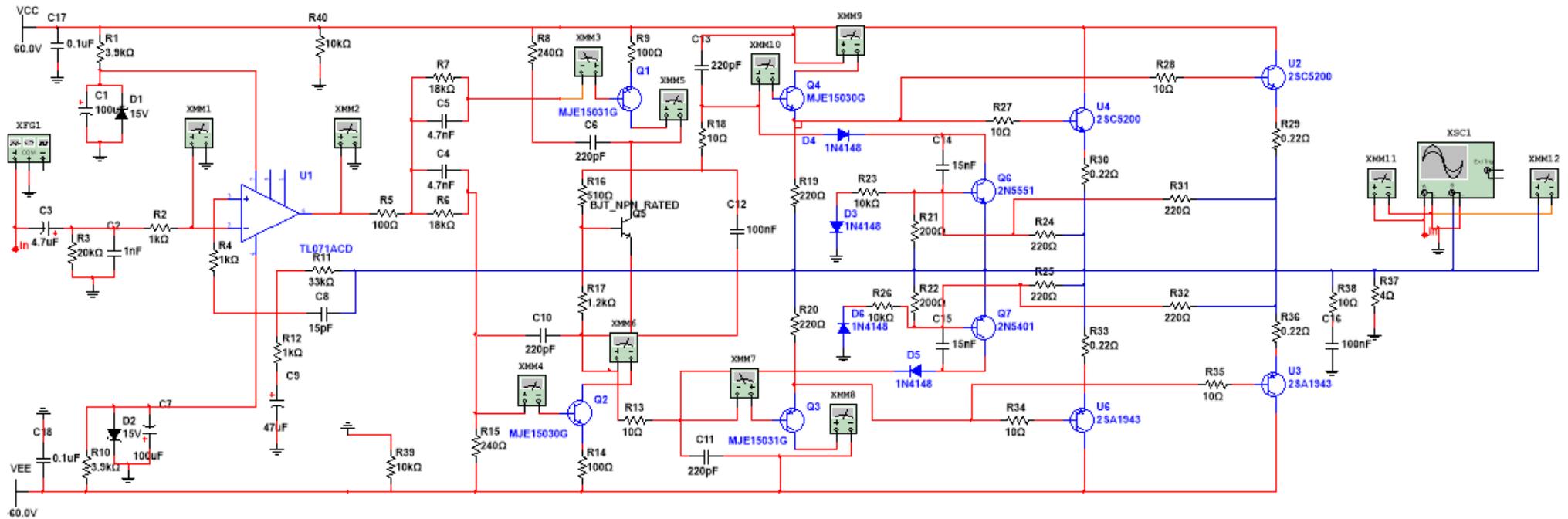


Figura 77. Puntos de medición del amplificador de audio.

Elaborado por: Investigadora

- Anexo E: Diseño del módulo del amplificador

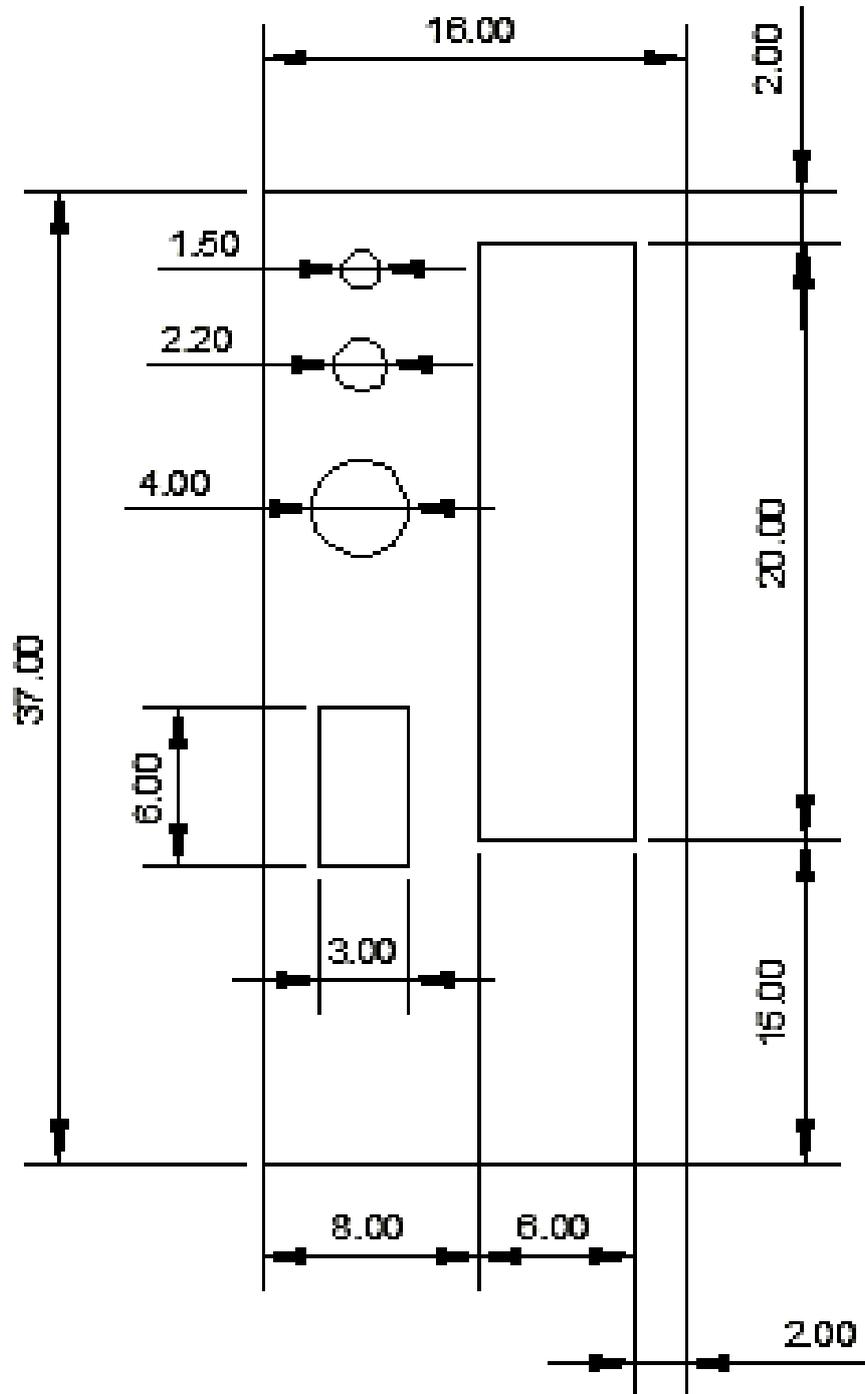


Figura 78. Diseño del módulo del amplificador.

Elaborado por: Investigadora