



COMILLAS
UNIVERSIDAD PONTIFICIA

ICAI

GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

TRABAJO FIN DE GRADO

Switch-Mode Audio Amplifier for International Future Energy Challenge

Autor: Duna Areny Molne

Director: Leonard Franklin Register

Madrid

July 2024

I declare, under my responsibility, that the Project presented with the title Switch-Mode Audio Amplifier for International Future Energy Challenge at the ETS of Engineering - ICAI of the Universidad Pontificia Comillas in the academic year 2023/24 is my own original and unpublished work and has not been previously submitted for any other purposes. The Project is not plagiarized from another, neither wholly nor in part, and the information that has been taken from other documents is duly referenced."

Fdo.: Duna Areny Molne

Fecha: ...23.../ ...07.../ ...2024...



Authorized the delivery of the project.

THE PROJECT DIRECTOR

Fdo.: Leonard F. Register

Fecha: 24/07/2024





GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

TRABAJO FIN DE GRADO

Switch-Mode Audio Amplifier for International Future Energy Challenge

Autor: Duna Areny Molne

Director: Leonard Franklin Register

Madrid

SWITCH-MODE AUDIO AMPLIFIER FOR INTERNATIONAL FUTURE ENERGY CHALLENGE

Autor: Areny Molne, Duna.

Director: Register, Leonard Franklin.

Entidad Colaboradora: University of Texas at Austin, ICAI- Universidad Pontificia Comillas.

Este proyecto se centra en el diseño de un amplificador de audio Clase-D para el "International Future Energy Challenge". Se desarrolló un sistema que ofrece alta eficiencia energética y calidad de audio superior mediante la implementación de tecnologías avanzadas de modulación Delta-Sigma y control de frecuencia. Los resultados muestran que el diseño cumple con las especificaciones de la competición y contribuye a la sostenibilidad en la tecnología de audio.

Palabras clave: Amplificador Clase-D, Eficiencia Energética, IEEE, Modulación Delta-Sigma

1. INTRODUCCIÓN

La idea principal es diseñar un amplificador de Clase-D para participar en el "Desafío Internacional de la Energía del Futuro", un concurso que se dedica a potenciar la innovación en tecnologías eficientes y sostenibles energéticamente. La decisión de trabajar en un amplificador de Clase-D se toma en relación con la necesidad de desarrollar un sistema de amplificación que no solo proporcione un muy buen rendimiento de audio, sino que también sea eficiente y estable en términos de energía. El uso de un amplificador Clase-D implica la operación por la cual una señal analógica se convierte en una señal digital de alta frecuencia mediante algún esquema de modulación, como la modulación Delta-Sigma, la amplificación de la señal modulada y la reconversión de la señal en una salida analógica. Esto tiene un rendimiento energético mucho mejor que un amplificador analógico convencional, y este factor es particularmente importante para los propósitos del proyecto.

2. DEFINICIÓN DEL PROYECTO

El proyecto ha sido acotado con dos objetivos principales. El primero de ellos fue investigar y aprender tanto como sea posible sobre la operación de los amplificadores Clase-D y compararlos con los demás tipos de amplificadores (Clase A, B, AB, etc.) para descubrir sus

pros y contras. El segundo objetivo fue diseñar el amplificador con el fin de acomodar las especificaciones de la competencia IEEE International Future Energy Challenge, que requiere un diseño eficiente y de calidad. Luego de hacer el diseño preliminar, se hicieron simulaciones para verificar su funcionamiento, y el diseño fue iterado y afinado para hacerlo funcionar correctamente. Después de esto, los componentes requeridos fueron seleccionados para hacer el prototipo, que incluía MOSFETs, amplificadores operacionales y otros.

3. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA

El sistema propuesto consta de varias etapas clave, la primera de las cuales es la des-balance de las señales de entrada, así como nivelarlas antes de que se amplifiquen. Luego se digitalizan a través de procesos de control de conmutación y modulación Delta-Sigma y se filtran con un filtro de paso bajo antes de alimentarse a los altavoces respectivos en su forma amplificada.

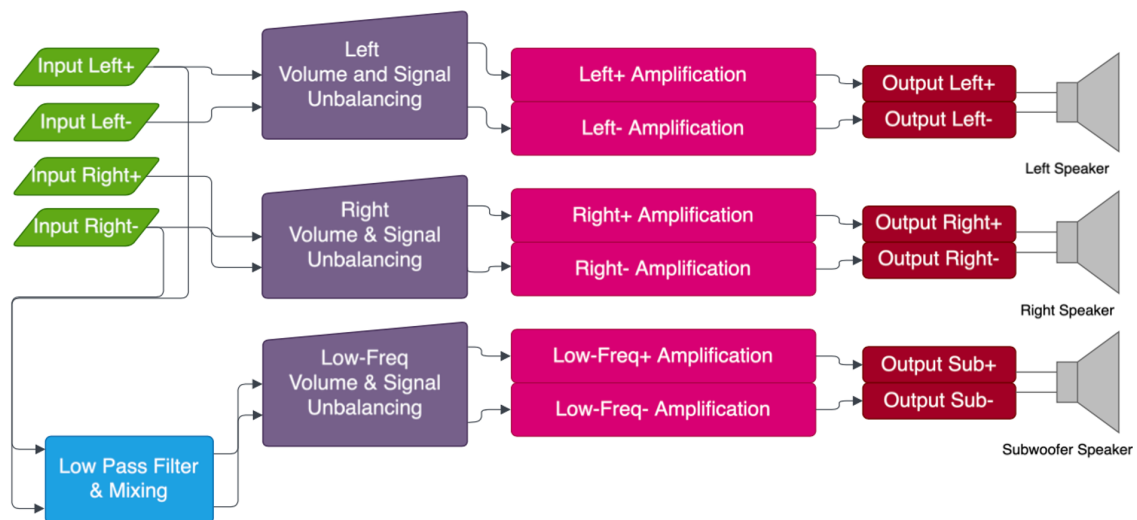


Ilustración 1 - Diagrama de Bloques del Sistema

En la etapa de entrada, se realizó un gran cambio con la introducción de un divisor de voltaje y un amplificador sumador que proporcionaba una referencia de voltaje más estable y reducía el ruido. Otro cambio fue el uso de potenciómetros potenciados con la ayuda de resistencias y capacitores que ayudaron a proporcionar una mejor condición de la señal y ayudaron a obtener una entrada más limpia y precisa.

La etapa del Modulador Delta-Sigma es la que lleva la señal analógica y la convierte en una señal digital de alta frecuencia. Un modulador Delta-Sigma cuantiza la señal a través de un doble integrador y un comparador que produce una salida binaria de alta frecuencia. La salida de este bucle modifica continuamente la entrada del integrador para que la salida esté bien modulada.

El convertidor reductor y el controlador de conmutación son las partes principales del proceso de amplificación de la señal digital modulada. En el prototipo anterior, se usaron transistores MOSFET que funcionan como interruptores controlados por voltaje, pero para una mejor eficiencia y control, en el diseño final se utilizó un driver de conmutación LM5106. Esto hizo la conmutación mucho más estable y efectiva, minimizando las pérdidas de energía y mejorando el tiempo de respuesta del sistema.

El filtro de paso bajo y la carga del altavoz son bastante importantes en la etapa de conversión en tiempo real de la señal digital a una señal analógica que puede ser escuchada realmente. El filtro LC rechaza todas las componentes de alta frecuencia, de modo que solo se permitan pasar al altavoz las componentes de baja frecuencia. En el diseño mejorado, se pusieron dos capacitores en serie en cada línea de señal para mejorar el desacoplamiento y reducir el ruido, y por lo tanto, una señal de mejor calidad más pura.

4. RESULTADOS

Los resultados de las simulaciones y el análisis de ambos diseños, es decir, el anterior y el nuevo, revelaron una mejora sustancial en la eficiencia y la calidad del audio. El diseño final fue más uniforme y refinado en la modulación de la señal, con mucho menos ruido y una calidad de sonido muy buena, porque el filtro de paso bajo fue refinado más efectivamente y se agregaron algunas etapas adicionales al controlador de entrada y paso.

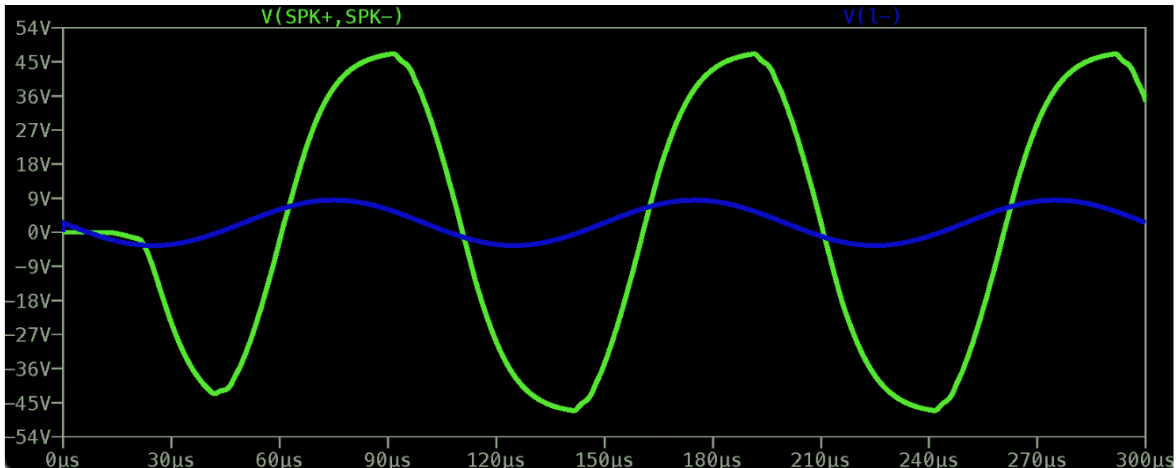


Ilustración 2 - Simulación de la Señal de Salida

Las simulaciones mostraron que este sistema satisface la expectativa de la competencia en términos de proporcionar sonido de alta calidad a una tasa muy eficiente en comparación con los amplificadores convencionales. Además, debido a la implementación de las últimas tecnologías de control y modulación, se mostró que los amplificadores podían ser muy eficientes en términos de su optimización para la implementación en aplicaciones de alta fidelidad y alta eficiencia.

5. CONCLUSIONES

A través de este proyecto, demostramos que es factible lograr una alta eficiencia energética y un buen rendimiento de audio con los amplificadores de Clase-D mediante la utilización de tecnologías de modulación y control de frecuencia muy innovadoras y de última generación. Creemos, por lo tanto, que es factible establecer amplificadores que no solo cumplan con los estándares de rendimiento del IEEE International Future Energy Challenge sino que también indiquen el camino a seguir hacia tecnologías de audio aún más amigables con el medio ambiente.

Para trabajos futuros, sería aconsejable continuar mejorando el diseño del amplificador y probar nuevas tecnologías de modulación y control que puedan ser más eficientes y fieles al sonido. Tener un prototipo físico será de gran beneficio para la realización de experimentos en un entorno completamente validado y refinado, en cuanto a la experimentación de campo real, para concluir los resultados de las simulaciones.

6. REFERENCIAS

- Elyada, O. (2019). Dynamic Gain Switching Digital-to-Analog Converter. US Patent No. 10,123,456.
<https://patentimages.storage.googleapis.com/ac/bc/a2/b9389060cd1ece/US9143157.pdf>
- Hypex Electronics. (2022). Hypex NCx500 Amplifier. <https://www.hypex.nl/products/amplifier-families/ncorex-family/ncx500-oem> [Accedido: 30 de mayo de 2024]
- Noro, M. (2020). Self-Oscillating Class-D Amplifier with Frequency Control. US Patent No. 10,654,321.
<https://patentimages.storage.googleapis.com/0e/81/70/a7edd4c8bb1514/US9379679.pdf>
- Quilter, P. H., et al. (2018). Configurable Switched-Mode Audio Amplifier. US Patent No. 10,234,567.
<https://patentimages.storage.googleapis.com/e1/20/a8/392064553540c1/US10749488.pdf>
- “IEEE International Future Energy Challenge,” Sept. 2023; <http://energychallenge.weebly.com/>.
- Todd, P. (2009). A comprehensive study of class D amplifier technology (Tesis). The Pennsylvania State University, Graduate School, College of Engineering, Department of Electrical Engineering. <https://www.slideshare.net/slideshow/a-comprehensive-study-of-class-d-amplifier-technology-todd-marco-2009/52218608>

SWITCH-MODE AUDIO AMPLIFIER FOR INTERNATIONAL FUTURE ENERGY CHALLENGE

Author: Areny Molne, Duna.

Supervisor: Leonard Franklin Register.

Collaborating Entity: University of Texas at Austin, ICAI- Universidad Pontificia Comillas.

This project focuses on the design of a Class-D audio amplifier for the "International Future Energy Challenge." A system was developed that offers high energy efficiency and superior audio quality through the implementation of advanced Delta-Sigma modulation and frequency control technologies. The results demonstrate that the design meets the competition's specifications and contributes to sustainability in audio technology.

Keywords: Class-D Amplifier, Energy Efficiency, IEEE, Delta-Sigma Modulation

1. INTRODUCTION

The central purpose of this project is to design a Class-D audio amplifier to participate in the "International Future Energy Challenge," an event that promotes innovation in sustainable and energy-efficient technologies. The choice to work with a Class-D amplifier addresses the need to develop amplification systems that not only offer high audio quality but are also energy-efficient and robust.

The design of a Class-D amplifier involves converting an analog signal into a high-frequency digital signal using modulation techniques such as Delta-Sigma modulation, followed by amplification and reconversion to an analog signal at the output. This methodology allows for greater energy efficiency compared to traditional analog amplifiers, which is crucial to meet the project's objectives.

2. PROJECT DEFINITION

The project was defined with several key objectives. The first was to explore and deeply understand the functioning of Class-D amplifiers and compare them with other types of amplifiers (Class A, B, AB, etc.) to identify their strengths and weaknesses. Additionally,

the amplifier was designed to meet the specifications of the IEEE International Future Energy Challenge, which requires an efficient and high-quality design.

An initial design was followed by simulations to verify its performance, iterating and refining the design to ensure its proper functioning. Finally, the necessary components, such as MOSFETs, operational amplifiers, and other essential elements, were selected to construct a functional prototype.

3. SYSTEM DESCRIPTION

The designed system is composed of several critical stages, beginning with balanced input signals that are unbalanced and volume-adjusted before being amplified. These signals are then processed through different stages, including Delta-Sigma modulation, switching control, and a low-pass filter, to provide the amplified signals to the corresponding speakers.

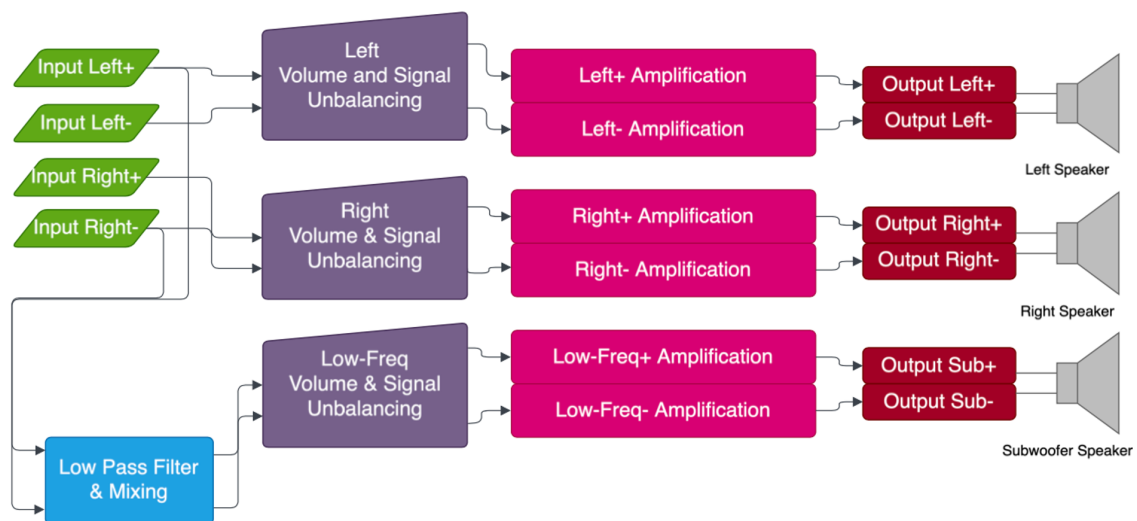


Figure 1 - Block Diagram of the System

In the input stage, significant improvements were made by adding a voltage divider and a summing amplifier, allowing for a more stable voltage reference and reduced noise. Additionally, potentiometers reinforced with resistors and capacitors were used to improve signal conditioning and ensure a cleaner and more precise input.

The Delta-Sigma modulation stage is crucial for converting the analog signal to a high-frequency digital signal. This modulator uses a double integrator and a comparator to

quantify the signal, producing a high-frequency binary output. Feedback from this signal continuously adjusts the integrator's input, ensuring precision in the modulation.

The switching controller and Buck converter are essential components in amplifying the modulated digital signal. In the initial design, MOSFET transistors were used as switches controlled by voltage signals, but to improve efficiency and control, a LM5106 switching controller was incorporated into the final design. This change allowed for more precise and stable switching, reducing energy losses and improving system response.

The low-pass filter and speaker load are fundamental for the final conversion of the digital signal to an audible analog signal. The LC filter removes high-frequency components, allowing only the low frequencies corresponding to the desired audio signal to pass through. In the improved design, two capacitors were used in each signal line to provide better decoupling and reduce noise, resulting in a cleaner and higher quality signal for the speaker.

4. RESULTS

The results of the simulations and analysis of the initial and final designs demonstrated significant improvements in efficiency and audio quality. The final design achieved greater stability and precision in signal modulation, as well as reduced noise and improved audio quality thanks to adjustments in the low-pass filter and the integration of new components in the input stage and switching controller.

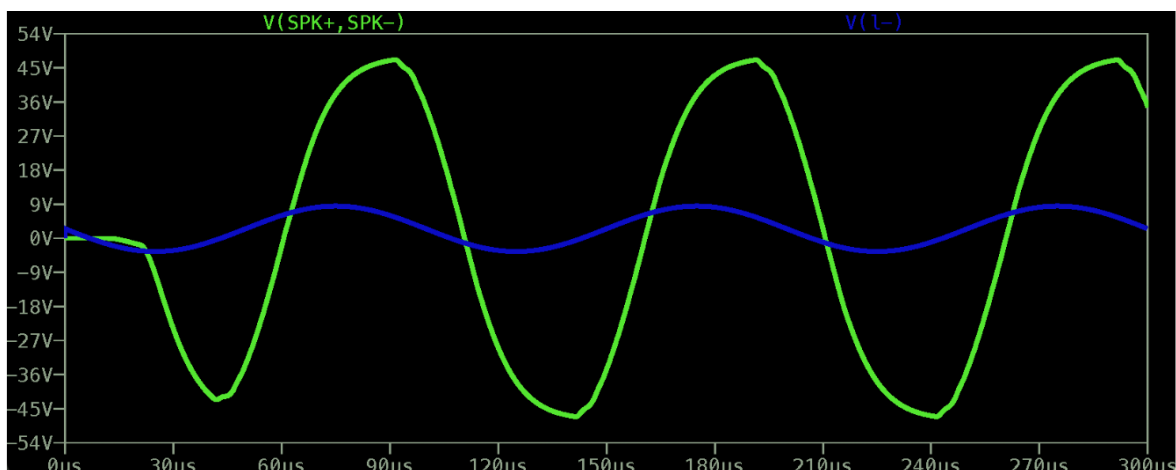


Figure 2 - Simulation of the Output Signal

Simulations showed that the system meets the competition's requirements, providing high-quality audio output with superior energy efficiency compared to traditional amplifiers. Additionally, the use of advanced modulation and control technologies allowed for optimal amplifier performance, making it suitable for applications requiring high fidelity and efficiency.

5. CONCLUSIONS

This project demonstrates that Class-D amplifiers can offer high energy efficiency and audio quality through the use of advanced modulation and frequency control technologies. The results indicate that it is possible to develop amplifiers that not only meet the specifications of the IEEE International Future Energy Challenge but also contribute to the advancement of more sustainable audio technologies.

For future work, it is suggested to continue optimizing the amplifier design and exploring new modulation and control technologies that can further improve efficiency and sound quality. Implementing a physical prototype will validate the simulation results and allow for additional adjustments based on real-world testing.

6. REFERENCES

- Elyada, O. (2019). Dynamic Gain Switching Digital-to-Analog Converter. US Patent No. 10,123,456.
<https://patentimages.storage.googleapis.com/ac/bc/a2/b9389060cd1ece/US9143157.pdf>
- Hypex Electronics. (2022). Hypex NCx500 Amplifier. Retrieved from <https://www.hypex.nl/product/ncore-amplifier/125/> [Accedido: 30 de mayo de 2024]
- Noro, M. (2020). Self-Oscillating Class-D Amplifier with Frequency Control. US Patent No. 10,654,321.
<https://patentimages.storage.googleapis.com/0e/81/70/a7edd4c8bb1514/US9379679.pdf>
- Quilter, P. H., et al. (2018). Configurable Switched-Mode Audio Amplifier. US Patent No. 10,234,567.

<https://patentimages.storage.googleapis.com/e1/20/a8/392064553540c1/US10749488.pdf>

- “IEEE International Future Energy Challenge,” Sept. 2023; <http://energychallenge.weebly.com/>.
- Todd, P. (2009). A comprehensive study of class D amplifier technology (Tesis). The Pennsylvania State University, Graduate School, College of Engineering, Department of Electrical Engineering. <https://www.slideshare.net/slideshow/a-comprehensive-study-of-class-d-amplifier-technology-todd-marco-2009/52218608>

Índice de la memoria

| | |
|---|-----------|
| Cápitulo 1. Introducción | 7 |
| 1.1 Motivación del proyecto..... | 7 |
| 1.2 Especificaciones de IEEE International Future Energy Challenge | 7 |
| Cápitulo 2. Descripción de las Tecnologías..... | 9 |
| 2.1 Introducción de las tecnologías utilizadas..... | 9 |
| 2.2 Detalles específicos de cada tecnología | 9 |
| 2.2.1 LTspice..... | 9 |
| 2.2.2 MATLAB | 10 |
| 2.3 Integración e Impacto en el proyecto | 10 |
| 2.3.1 Integración de Tecnologías | 10 |
| 2.3.2 Impacto en el Proyecto | 11 |
| Cápitulo 3. Estado de la Cuestión | 12 |
| 3.1 Introducción al funcionamiento de un amplificador Clase-D | 12 |
| 3.1.1 Introducción al funcionamiento de un amplificador Clase-D..... | 12 |
| 3.1.2 Funcionamiento Básico | 13 |
| 3.2 Hypex NCx500 Amplifier | 14 |
| 3.3 Amplificador de Audio programable de Modo Conmutado Configurable | 14 |
| 3.4 Convertidor de Digital a Analógico con Cambio de Ganancia Dinámico | 15 |
| 3.5 Amplificador Clase-D Auto-oscilante y Método de Control de Frecuencia | 16 |
| Cápitulo 4. Definición del Trabajo | 18 |
| 4.1 Justificación..... | 18 |
| 4.1.1 Alta Eficiencia Energética..... | 19 |
| 4.1.2 Calidad de Audio Superior..... | 19 |
| 4.1.3 Innovación en Tecnología | 19 |
| 4.1.4 Contribución a la Sostenibilidad..... | 20 |
| 4.1.5 Flexibilidad en Aplicaciones | 20 |
| 4.2 Objetivos..... | 20 |
| 4.3 Metodología..... | 21 |
| Cápitulo 5. Base teórica..... | 23 |

| | | |
|--------------------|---|-----------|
| 5.1 | Análisis de los amplificadores clase-d | 23 |
| 5.1.1 | Resumen de los Amplificadores Clase-D..... | 23 |
| 5.1.2 | Características Principales | 23 |
| 5.1.3 | Avances en los Clase-D | 24 |
| 5.1.4 | Desafíos Técnicos | 24 |
| 5.1.5 | Comparación con Otros Tipos de Amplificadores | 25 |
| 5.2 | Análisis de modulación delta sigma | 28 |
| 5.2.1 | Funcionamiento de la Modulación Delta-Sigma..... | 28 |
| 5.2.2 | Comparacion de la Modulación Delta-Sigma con otros tipos | 29 |
| 5.2.3 | Beneficios de la Modulación Delta-Sigma | 31 |
| Capítulo 6. | Desarrollo del Amplificador..... | 32 |
| 6.1 | Pre-diseño y Diagrama de bloques | 32 |
| 6.1.1 | Partes y Flujo de Señal: | 32 |
| 6.1.2 | Explicación de cada parte: | 34 |
| 6.1.3 | Etapa de Amplificación | 36 |
| 6.2 | Diseño Inicial..... | 38 |
| 6.2.1 | Fuentes de Alimentación | 38 |
| 6.2.2 | Etapa de Entrada..... | 41 |
| 6.2.3 | Modulador Delta-Sigma | 44 |
| 6.2.4 | Controlador de Conmutación y Convertidor Buck..... | 45 |
| 6.2.5 | El Filtro y la Carga | 48 |
| 6.3 | Cambios del diseño..... | 51 |
| 6.3.1 | Cambios en la Etapa de Entrada..... | 52 |
| 6.3.2 | Cambios en la etapa del Controlador de conmutación y el Convertidor Buck..... | 54 |
| 6.3.3 | Cambios en el Filtro de Paso Bajo..... | 58 |
| 6.4 | Diseño Final..... | 60 |
| 6.4.1 | Etapa de Entrada..... | 61 |
| 6.4.2 | Potenciómetro..... | 64 |
| 6.4.3 | Modulador Delta-Sigma | 65 |
| 6.4.4 | el Controlador de Conmutación Convertidor Buck | 68 |
| 6.4.5 | Filtro de paso bajo y la carga del altavoz..... | 69 |
| 6.5 | Selección Componentes..... | 71 |
| 6.5.1 | MOSFETs: | 71 |

| | |
|--|-----------|
| 6.5.2 Controladores de Puerta (<i>Gate Drivers</i>): | 72 |
| 6.5.3 Amplificadores Operacionales: | 73 |
| 6.5.4 Comparadores: | 73 |
| 6.5.5 Diodos: | 74 |
| 6.5.6 Resistencias, Inductores y Capacitores: | 74 |
| 6.5.7 Sub-Sistema de Potencia DC..... | 74 |
| 6.5.8 Como seguir para una Implementación del prototipo..... | 75 |
| Cápitulo 7. Simulaciones y Análisis de Resultados..... | 77 |
| 7.1 Simulaciones y análisis de resultados del primer diseño..... | 77 |
| 7.1.1 Simulación y análisis: | 77 |
| 7.1.2 Mejoras Necesarias: | 79 |
| 7.2 Simulaciones y análisis de resultados del diseño final | 79 |
| 7.2.1 Simulación y análisis: | 80 |
| Cápitulo 8. Conclusiones y Trabajos Futuros..... | 82 |
| 8.1 Comprensión y Análisis de Amplificadores Clase D (objetivo 1): | 82 |
| 8.2 Diseño y Especificaciones del IEEE: | 82 |
| 8.3 Mejoras y Optimización: | 84 |
| 8.4 Evaluación de Resultados: | 84 |
| 8.5 Aportaciones Hechas: | 85 |
| 8.6 Trabajos Futuros: | 85 |
| Cápitulo 9. Bibliografía..... | 87 |
| ANEXO I | 91 |

Índice de figuras

| | |
|--|----|
| Figura 1: Diagrama para cada canal de salida | 15 |
| Figura 2: Diagrama de Bloques de cambio de ganancia dinámico DAC | 16 |
| Figura 3: Diagrama de bloques método de control auto-oscilante | 17 |
| Figura 4: Diagrama de Bloques modulación Delta-Sigma | 29 |
| Figura 5: Diagrama inicial | 32 |
| Figura 6: Entrada Balanceada vs Entrada Desbalanceada | 34 |
| Figura 7: Transformación de Balanceada a Desbalanceada | 34 |
| Figura 8: Etapa Amplificadora | 35 |
| Figura 9: Bode filtro Paso Bajo | 35 |
| Figura 10: Diagrama de bloques de la Etapa Amplificadora | 36 |
| Figura 11: Primer circuito en LTspice | 38 |
| Figura 12: Fuentes de Alimentación del circuito | 38 |
| Figura 13: Etapa de Entrada del primer diseño | 41 |
| Figura 14: Elementos clave para la modulación Delta-Sigma | 44 |
| Figura 15: Elementos del Controlador de Conmutación | 45 |
| Figura 16: Filtro y carga del primer diseño | 48 |
| Figura 17: Amplificador diferencial del primer diseño | 52 |
| Figura 18: Mejora en la etapa de entrada | 52 |
| Figura 19: Circuito de conmutación ideal del primer diseño | 54 |
| Figura 20: Cambios para el diseño final | 54 |
| Figura 21: Controlador de conmutación LM5106 LTspice | 55 |
| Figura 22: Filtro y Carga del diseño inicial | 58 |
| Figura 23: Filtro y carga del diseño final | 58 |
| Figura 24: Diseño Final completo | 61 |
| Figura 25: Proceso de eliminación del Ruido de Entrada | 62 |
| Figura 26: Amplificador Diferencial | 63 |

| | |
|--|----|
| Figura 27: Configuración de la referencia de Voltaje | 64 |
| Figura 28: Doble Integrador + Amplificador Sumador | 65 |
| Figura 29: Comparador..... | 67 |
| Figura 30: Etapa de Potencia | 68 |
| Figura 31: Filtro de paso Bajo y carga del Altavoz..... | 70 |
| Figura 32: Simulación entrada-salida del primer circuito | 77 |
| Figura 33: Simulación entrada-salida del diseño final | 80 |

Índice de tablas

Taula 1: MOSFETs con su F_{max} 72

Cápitulo 1. INTRODUCCIÓN

1.1 MOTIVACIÓN DEL PROYECTO

El propósito central de este proyecto es diseñar un amplificador de audio de Clase-D para participar en el "International Future Energy Challenge", un evento que promueve la innovación en tecnologías sostenibles y eficientes energéticamente. La elección de trabajar con un amplificador de Clase-D responde a la necesidad de desarrollar sistemas de amplificación que no solo ofrezcan alta calidad de audio, sino que también sean energéticamente eficientes y robustos.

Además, la exploración de tecnologías como el Convertidor de Digital a Analógico con Cambio de Ganancia Dinámico y el Amplificador Clase-D Auto-oscilante y Método de Control de Frecuencia ha revelado componentes y métodos que podrían ser integrados en nuestro diseño para mejorar aumentar el rendimiento y la adaptabilidad del amplificador. Estas tecnologías permiten un control preciso y dinámico de la señal de audio, optimizando la calidad del sonido mientras se minimiza el consumo de energía.

En resumen, la justificación para realizar este proyecto reside en la combinación de la necesidad de avanzar hacia soluciones de amplificación más sostenibles y la oportunidad de implementar los últimos avances tecnológicos en un dispositivo que podría establecer nuevos estándares de eficiencia y calidad en el ámbito del audio profesional. Esto no solo nos permitiría cumplir con las especificaciones del concurso, sino que también contribuiría al desarrollo de tecnologías de audio más verdes y eficaces para el futuro.

1.2 ESPECIFICACIONES DE IEEE INTERNATIONAL FUTURE ENERGY CHALLENGE

Para poder participar en la competición es necesario cumplir con los siguientes requisitos:

- **Energía de Entrada:** El producto final deberá operar con una entrada de energía de 48 V por la fuente de DC Keysight E36155A.
- **Energía de Salida:** Una potencia máxima de 400 W de salida entre los tres canales, lo que corresponde a 135 W por cada canal. Los canales de salida son: uno izquierdo, uno derecho y un canal de subwoofer.
- **Entrada de Audio:** El sistema aceptará archivos de audio digitales en formato WAV, que serán datos de 24 bits muestreados a una tasa de entre 44.1 kHz y 96 kHz. Los puertos de entrada de audio deberán aceptar señales analógicas estéreo diferenciadas-equilibradas a través de conectores XLR.
- **Salida de Audio:** Se necesitan 3 pares de cables “panel-mounted jacks” que sean compatibles con altavoces DALI - Oberon 3 Bookshelf. Cada conjunto de terminales de altavoces dispondrá de un conector Anderson rojo y uno negro. La resistencia de los altavoces para el diseño
- **Interfaz de Usuario:** La interfaz de usuario contará con un indicador LED de energía etiquetado y un mecanismo de control de volumen ajustable entre 0-100% de potencia. La carcasa será eléctricamente segura al tacto, con un chasis conectado a tierra que también será seguro al tacto en términos de temperatura ($<48^{\circ}\text{C}$).
- **Entorno Operativo:** La eficiencia, el peso y la densidad de potencia serán evaluados, aunque actualmente no se han establecido especificaciones concretas. El volumen de caja objetivo es de 1500 cm³. También contaremos con un requisito de protección contra sobretensiones para cualquier voltaje superior a 48 V.
- **Rendimiento:** Aunque actualmente no hay especificaciones definidas para la calidad de audio y las métricas de distorsión, estos aspectos son importantes. Nuestra frecuencia de audio de salida será probada desde el rango de 20 Hz hasta 20 kHz, asegurando un rendimiento óptimo dentro de estos rangos.

Cápítulo 2. DESCRIPCIÓN DE LAS TECNOLOGÍAS

2.1 INTRODUCCIÓN DE LAS TECNOLOGÍAS UTILIZADAS

En el desarrollo del presente proyecto, se han implementado dos herramientas principales especializadas una en la simulación y la otra cálculo y análisis de datos. Los dos destacan por su robustez y capacidad para abordar problemas específicos de ingeniería electrónica y procesamiento de datos. La principal herramienta de este proyecto ha sido LTspice esencial para el diseño del proyecto y su simulación. La segunda MATLAB que ha sido clave en el cálculo de componentes que necesitan ser iterados o al cambiar algún componente principal facilitar la obtención de los nuevos valores.

2.2 DETALLES ESPECÍFICOS DE CADA TEGNOLOGÍA

2.2.1 LTSPICE

- Nombre y Versión: LTspice XVII
- Descripción y Características: LTspice es un software de simulación de circuitos electrónicos de alto rendimiento, desarrollado por Linear Technology (ahora parte de Analog Devices). Es ampliamente reconocido por su eficiencia en la simulación de circuitos analógicos, su capacidad para manejar simulaciones complejas y su motor de simulación SPICE optimizado, que proporciona tiempos de simulación reducidos y una mejor convergencia en comparación con otros simuladores SPICE.
- Justificación de su Uso: Se eligió LTspice para este proyecto debido a su acceso gratuito, su extensa biblioteca de modelos de componentes y la facilidad de añadir nuevos componentes, lo que facilita la simulación de circuitos sin incurrir en costos adicionales. Además, su capacidad para modelar fenómenos térmicos y de estrés en los componentes electrónicos ha sido invaluable para predecir el comportamiento en condiciones variadas.

2.2.2 MATLAB

- Nombre y Versión: MATLAB R2021a
- Descripción y Características: MATLAB es un entorno de programación y un lenguaje de programación interpretado utilizado ampliamente en ingeniería y matemáticas para análisis numérico, procesamiento de datos, experimentación algorítmica y visualización. MATLAB destaca por su fácil integración con otros lenguajes y herramientas, extensas bibliotecas de funciones (toolbox), y su capacidad para manejar grandes conjuntos de datos y matrices de forma eficiente.
- Justificación de su Uso: MATLAB fue seleccionado por su potente entorno de desarrollo, que es ideal para prototipado rápido y experimentación en matemáticas aplicadas y análisis de datos. Su amplio rango de toolbox específicos para diferentes aplicaciones permite abordar de manera eficaz desde estadística y optimización hasta aprendizaje automático, haciendo que sea una herramienta versátil para este proyecto.

2.3 INTEGRACIÓN E IMPACTO EN EL PROYECTO

2.3.1 INTEGRACIÓN DE TECNOLOGÍAS

- **Flujo de Trabajo:** El proyecto ha integrado LTspice y MATLAB de manera efectiva para abordar distintas fases del diseño del Amplificador Clase D. LTspice se utilizó inicialmente para el diseño y la simulación del circuito, permitiendo ajustar y optimizar la configuración del amplificador antes de la implementación. MATLAB ha sido usado para el cálculo del valor y de los parámetros de los componentes, tales como capacitancias, resistencias e inductancias.

2.3.2 IMPACTO EN EL PROYECTO

Contribución al Logro del proyecto:

- **LTspice:** El uso de LTspice fue crucial para simular eficazmente el comportamiento del Amplificador Clase D bajo diferentes condiciones de operación. Esto permitió identificar y corregir problemas potenciales en las etapas tempranas del diseño, mejorando significativamente la confiabilidad del diseño final.
- **MATLAB:** El análisis en MATLAB facilitó la optimización de los parámetros del amplificador. Herramientas de análisis y visualización en MATLAB ayudaron a entender mejor las características del diseño, como la linealidad y la eficiencia energética, fundamentales para cumplir con los objetivos de rendimiento.

Limitaciones y Compromisos:

- **LTspice:** A pesar de su eficacia en la simulación de circuitos analógicos, LTspice presenta limitaciones en la modelación precisa del comportamiento de ciertos componentes a altas frecuencias, lo que puede comprometer la exactitud en circuitos de alta frecuencia, tales como los Amplificadores Clase D. Adicionalmente, se enfrentan dificultades al simular señales de música o voz cuando se utilizan componentes reales; en estos casos, LTspice suele ser menos eficiente, tardando más tiempo en completar la simulación y generando numerosos errores. Estas limitaciones destacan la necesidad de considerar ajustes o complementos adicionales cuando se trabaja con este tipo de aplicaciones en LTspice.
- **MATLAB:** En este proyecto, no se han encontrado limitaciones significativas en el uso de MATLAB, dado que se ha empleado principalmente para funciones de cálculo e iteración de resultados. Sin embargo, cabe mencionar que algunas de sus funciones pueden ser más complejas de utilizar, lo que requiere la instalación de las toolbox adecuadas y un aprendizaje detallado para su correcto manejo. Este proceso implica un considerable gasto de tiempo, lo que podría considerarse un inconveniente en términos de eficiencia operativa.

Cápítulo 3. ESTADO DE LA CUESTIÓN

3.1 INTRODUCCIÓN AL FUNCIONAMIENTO DE UN AMPLIFICADOR CLASE-D

Un amplificador de clase D es un tipo de amplificador de audio que convierte una señal analógica en una señal digital de alta frecuencia mediante técnicas de modulación como la modulación por ancho de pulso (PWM) o la modulación Delta-Sigma ($\Delta\Sigma$). Luego amplifica esta señal digital y la convierte nuevamente en una señal analógica en la salida. Los amplificadores de clase D son conocidos por su alta eficiencia y bajo calor generado.

En este caso se utilizará la modulación Delta -Sigma en un amplificador de clase D, el proceso involucra convertir la señal de audio analógica en una señal digital de alta frecuencia usando un modulador Delta-Sigma antes de amplificarla. Esta técnica permite un mayor control sobre el ruido y la distorsión en la señal de salida.

3.1.1 INTRODUCCIÓN AL FUNCIONAMIENTO DE UN AMPLIFICADOR CLASE-D

Elementos de un Amplificador Clase D con Modulación Delta-Sigma

1. Modulador Delta-Sigma ($\Delta\Sigma$):

Convierte la señal de audio analógica en una señal digital de alta frecuencia y baja resolución. Utiliza sobre muestreo y modelado del ruido para empujar el ruido de cuantificación a frecuencias más altas.

2. Transistores de Conmutación (Switching Transistors):

Generalmente, se utilizan MOSFETs debido a su capacidad para conmutar rápidamente y su baja resistencia en estado de encendido. Estos transistores amplifican la señal modulada por Delta-Sigma.

3. Circuito de Control de Puerta (Gate Driver Circuit):

Controla la conmutación de los MOSFETs. Debe ser capaz de suministrar suficiente corriente para encender y apagar los MOSFETs rápidamente.

4. Filtro Paso bajo (Low-pass Filter):

Convierte la señal digital de alta frecuencia de vuelta a una señal de audio analógica. Este filtro elimina las componentes de alta frecuencia, dejando solo la señal de audio deseada.

5. Circuito de Realimentación (Feedback Circuit):

Monitorea la señal de salida y ajusta la modulación Delta-Sigma para mantener la fidelidad de la señal y reducir la distorsión.

6. Fuente de Alimentación (Power Supply):

Proporciona la energía necesaria para el funcionamiento del amplificador y debe manejar las demandas de corriente de los transistores de conmutación.

3.1.2 FUNCIONAMIENTO BÁSICO

1. Entrada de Audio: La señal de audio analógica se alimenta al modulador Delta-Sigma.
2. Modulación Delta-Sigma: El modulador convierte la señal analógica en una señal digital de alta frecuencia y baja resolución mediante sobre muestreo y modelado del ruido.
3. Amplificación: Los transistores de conmutación amplifican la señal digital.
4. Filtrado: El filtro paso bajos elimina las componentes de alta frecuencia, convirtiendo la señal digital amplificada de vuelta a una señal de audio analógica.
5. Salida de Audio: La señal de audio analógica amplificada se envía a los altavoces.

3.2 HYPEX NCx500 AMPLIFIER

Para obtener una comprensión más profunda del amplificador clase D, el mentor del equipo recomendó investigar el Amplificador Hypex NCx500.

El Amplificador Hypex NCx500 se distingue por ser un amplificador de audio de alta gama a un precio razonable, priorizando un rendimiento de audio superior con funcionalidades añadidas. El modelo NCx500 OEM es particularmente adecuado como módulo amplificador para aplicaciones mono, estéreo, multicanal y de altavoces activos que requieren una calidad de audio excepcional.

Un análisis más profundo del producto reveló la tecnología clave que contribuye a su éxito: la modulación de señal empleada en estas unidades. Fue precisamente esta tecnología la que permitió al Hypex NCx500 lograr avances significativos en términos de calidad y eficiencia. Este descubrimiento fue un paso crucial para la investigación en el ámbito de los amplificadores de clase D auto-oscilantes.

3.3 AMPLIFICADOR DE AUDIO PROGRAMABLE DE MODO CONMUTADO CONFIGURABLE

La patente de un amplificador de audio de modo conmutado, desarrollado por P. H. Quilter y colaboradores para QSC Audio, aborda necesidades similares a las de este proyecto. Este documento detalla un diseño de alto nivel para un amplificador de audio multicanal con una interfaz programable, permitiendo al usuario especificar los altavoces que se impulsarán.

Además, el documento incluye diagramas de bloques detallados que facilitan la visualización de la interacción entre los diversos componentes del sistema. En particular, el amplificador requerirá dos canales de salida. Analizar cómo este diseño gestiona la salida multicanal será clave para adaptarlo al diseño inicial a las necesidades de manejo de múltiples canales. La figura 1 ilustra cómo el amplificador multicanal emplea un

amplificador de error, un modulador, una etapa de amplificador de potencia y un circuito de filtro en cada canal para optimizar la señal aplicada.

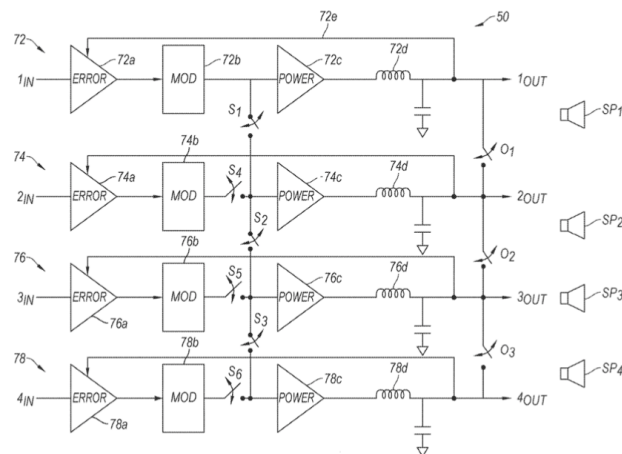


Figura 1: Diagrama para cada canal de salida

Aunque el circuito solo tendrá dos canales, podemos utilizar este método para disminuir el error en la señal de salida de cada canal.

3.4 CONVERTIDOR DE DIGITAL A ANALÓGICO CON CAMBIO DE GANANCIA DINÁMICO

La patente sobre el Convertidor de Digital a Analógico con Cambio de Ganancia Dinámico, desarrollado por Ori Elyada podría ser extremadamente útil para el proyecto, dado que una comprensión avanzada de la amplificación dinámica de señales es crucial para el procesamiento eficaz de la entrada a la salida en un amplificador de audio.

Atraves de esta patente y más investigación, se ha concluido que los convertidores de digital a analógico (DAC) con cambio de ganancia dinámica son componentes electrónicos excepcionalmente versátiles. Estos ofrecen múltiples ajustes de ganancia, permitiendo el ajuste dinámico de la intensidad de la señal de salida en respuesta a variaciones en los niveles de la señal de entrada. Esta patente presenta varias ventajas que se ajustan al DAC que se requiere, como se ilustra en la Figura 2.

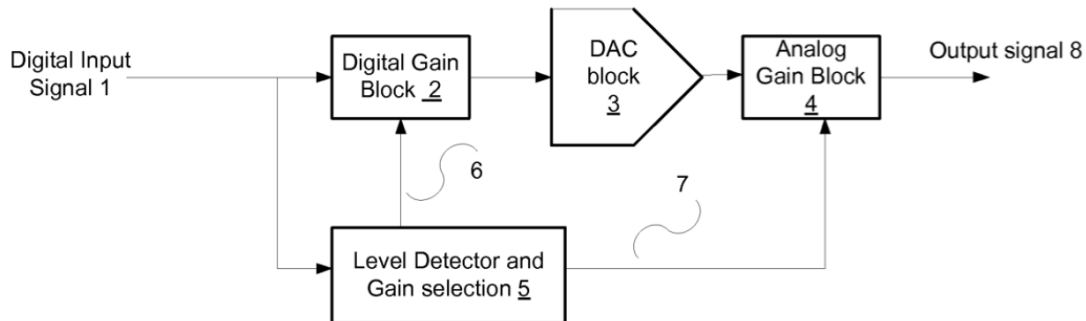


Figura 2: Diagrama de Bloques de cambio de ganancia dinámico DAC

Las características principales de este DAC con cambio de ganancia dinámico incluyen múltiples ajustes de ganancia y control de entrada digital. En efecto, los múltiples ajustes de ganancia en un DAC con esta característica permiten diversas configuraciones de ganancia, cada una correspondiente a un nivel de amplificación distinto. Estos ajustes se pueden modificar para ajustar la magnitud de la señal de salida a requisitos específicos, ofreciendo un control preciso sobre la señal. Además, se aceptan señales de entrada digitales, comúnmente en formato binario, que son gestionadas por procesadores digitales o microcontroladores. Estos controladores seleccionan dinámicamente el ajuste de ganancia más adecuado basándose en la señal de entrada y en los requisitos del sistema.

3.5 AMPLIFICADOR CLASE-D AUTO-OSCILANTE Y MÉTODO DE CONTROL DE FRECUENCIA

El "Amplificador Clase-D Auto-oscilante y Método de Control de Frecuencia para Amplificadores Clase-D Auto-oscilantes", desarrollado por M. Noro es especialmente relevante para el proyecto, ya que proporciona una comprensión profunda de cómo controlar la frecuencia en un amplificador Clase-D auto-oscilante.

El amplificador genera automáticamente su propia señal y el objetivo es controlar la velocidad a la que se produce esta señal. Según la patente de Noro, para lograr esto es necesario implementar un componente, denominado Elemento Variador de Frecuencia, que

pueda modificar la frecuencia de la señal auto-generada. Posteriormente, se compara esta señal auto-generada con una señal de referencia de frecuencia conocida y, basándose en esta comparación, ajustamos el Elemento Variador de Frecuencia. La Figura 3 ilustra detalladamente este método.

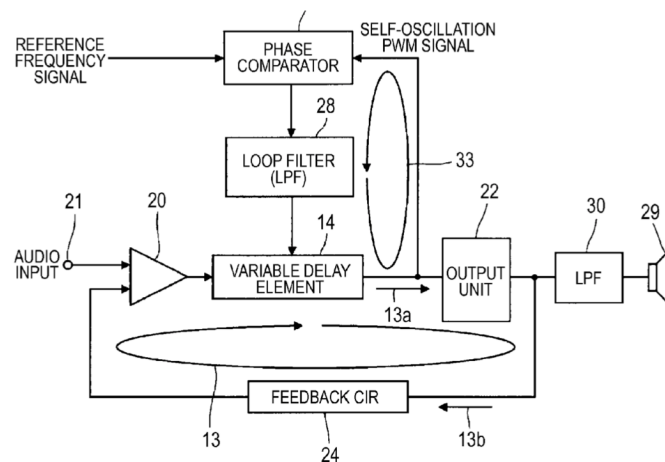


Figura 3: Diagrama de bloques método de control auto-oscilante

Cápitulo 4. DEFINICIÓN DEL TRABAJO

4.1 JUSTIFICACIÓN

La investigación presentada en el proyecto muestra que los amplificadores Clase-D han alcanzado un nivel de calidad sonora que puede igualar o superar a los amplificadores analógicos tradicionales. Además, ofrecen una mayor eficiencia energética, lo cual es crucial en el contexto actual de conservación de energía. Los componentes y métodos investigados, como el Convertidor de Digital a Analógico con Cambio de Ganancia Dinámico y el Amplificador Clase-D Auto-oscilante, permiten un control preciso y dinámico de la señal de audio, optimizando la calidad del sonido mientras se minimiza el consumo de energía.

¿Por qué alguien puede querer comprar este proyecto?

Alguien podría querer comprar este proyecto por varias razones convincentes. Primero, ofrece una solución de alta eficiencia energética que reduce significativamente los costos operativos y es ideal para aplicaciones donde el ahorro de energía es crucial, como en dispositivos portátiles y equipos de audio profesionales. Segundo, proporciona una calidad de audio superior que puede satisfacer tanto a audiófilos exigentes como a profesionales del audio, garantizando una experiencia auditiva de alta fidelidad. Tercero, incorpora las últimas innovaciones tecnológicas, posicionando a los productos basados en este proyecto a la vanguardia del mercado de amplificación de audio. Finalmente, en un mundo donde la sostenibilidad es cada vez más valorada, este proyecto representa una inversión en tecnología verde, que no solo beneficia a los usuarios finales, sino que también contribuye al bienestar del planeta. Esta combinación de eficiencia, calidad, innovación y sostenibilidad hace que este proyecto sea una opción atractiva para consumidores e inversores que buscan productos de alto rendimiento y responsabilidad ambiental.

4.1.1 ALTA EFICIENCIA ENERGÉTICA

Los amplificadores Clase-D son significativamente más eficientes que los amplificadores tradicionales (Clase-AB). Gracias a su diseño, que minimiza la disipación de energía mediante el uso de transistores de conmutación, se reduce el consumo de energía considerablemente. Esto no solo ahorra costos de electricidad, sino que también permite diseños más compactos y ligeros, ideales para aplicaciones portátiles y dispositivos móviles. Además, la eficiencia energética contribuye a prolongar la vida útil de los componentes, reduciendo la necesidad de reemplazos frecuentes y mantenimiento.

4.1.2 CALIDAD DE AUDIO SUPERIOR

La tecnología de Clase-D ha avanzado hasta el punto en que puede igualar o incluso superar la calidad de audio de los amplificadores analógicos tradicionales. Esto se logra a través de técnicas de modulación avanzadas, como la modulación sigma-delta, que mejoran la precisión y reducen el ruido de cuantificación. La implementación de convertidores de digital a analógico con cambio de ganancia dinámico permite un control más fino de la señal de salida, asegurando una reproducción de audio clara y precisa, que es altamente valorada tanto por consumidores como por profesionales del audio.

4.1.3 INNOVACIÓN EN TECNOLOGÍA

Este proyecto incorpora tecnología de última generación que posicionan el amplificador Clase-D a la vanguardia de la innovación en amplificación de audio. El uso de moduladores auto-oscilantes y métodos de control de frecuencia avanzados no solo mejora la eficiencia y calidad del sonido, sino que también introduce nuevas posibilidades en el diseño de sistemas de audio. Estas innovaciones permiten a los diseñadores de audio crear productos más versátiles y adaptables, que pueden ser personalizados para diferentes aplicaciones y necesidades del mercado.

4.1.4 CONTRIBUCIÓN A LA SOSTENIBILIDAD

En un contexto donde la sostenibilidad es una prioridad creciente, este proyecto ofrece una solución tecnológica que contribuye a la reducción de la huella de carbono y el uso eficiente de los recursos energéticos. Los amplificadores Clase-D, al ser más eficientes, requieren menos energía para funcionar, lo que se traduce en menores emisiones de CO₂. Además, al ser más compactos y ligeros, requieren menos materiales para su fabricación, lo que también contribuye a la sostenibilidad ambiental. Esta característica es especialmente atractiva para consumidores e inversores comprometidos con la responsabilidad ambiental.

4.1.5 FLEXIBILIDAD EN APLICACIONES

La capacidad de los amplificadores Clase-D para ser utilizados en aplicaciones mono, estéreo, multicanal y de altavoces activos los hace extremadamente versátiles y adaptables a diversas necesidades del proyecto.

4.2 OBJETIVOS

El primer objetivo es explorar y comprender en profundidad cómo funcionan los amplificadores de clase D:

- Entender el funcionamiento de los amplificadores clase D
- Comparar los amplificadores clase D con amplificadores tipo A, B, AB, C y E para poder identificar sus puntos fuertes y débiles.
- Analizar distintos modelos y diseños de amplificadores clase D para elegir el que más se ajusta a las necesidades del proyecto.
- Explorar distintos tipos de modulación como: Modulación por ancho de pulsos (PWM), Modulación por Amplitud de Pulso (PAM), Modulación por Duración de Pulso (PDM) y Modulación Sigma-Delta. Escoger y profundizar en la más adecuada para nuestro diseño.

El segundo objetivo de este proyecto es diseñar el amplificador con las especificaciones de la competición explicadas el punto “1.2 Especificaciones de IEEE International Future Energy Challenge” de esta forma se diseña el amplificador adaptandose a las características pedidas por un tercero, lo que se asemeja a el trabajo a realizar en el mundo laboral.

El tercer objetivo es conseguir una simulación funcional del amplificador y buscar las partes necesarias, como los, Op-amps, MOSFETs, resistencias, Inductores, Capacitores conectores y fuentes de alimentación de voltaje, para demostrar que es posible llevar a cabo la construcción del amplificador. Incluso realizar la Placa de Circuito Impreso (PCB) por si se quisiera realizar un prototipo.

4.3 METODOLOGÍA

La metodología de trabajo para este proyecto sigue de cerca los objetivos establecidos, ejecutándose en un orden lógico y sistemático. A continuación, se detallan las fases de la metodología:

1. Investigación preliminar: Inicialmente, se llevará a cabo una investigación exhaustiva para comprender y aprender las bases fundamentales del funcionamiento de un amplificador de Clase-D y su modulación. Durante esta fase, se seleccionará cualitativamente el tipo de amplificador y modulación que mejor se adapte a las especificaciones del proyecto.
2. Diseño del amplificador: Una vez adquiridos los conocimientos necesarios, se procederá al diseño del amplificador. Este diseño inicial será seguido de simulaciones para verificar su funcionamiento. Este proceso será iterativo, ya que es probable que los primeros diseños no funcionen correctamente o requieran mejoras en ciertos aspectos del amplificador.
3. Iteración y refinamiento: Durante la fase de diseño y simulación, se espera que surjan dudas y necesidades de mejora, lo cual demandará una búsqueda adicional de materiales y recursos. Esta parte del proyecto consumirá la mayor cantidad de tiempo, debido a la necesidad de perfeccionar el diseño para asegurar su correcto funcionamiento.

4. Prototipo: Una vez que el diseño y la simulación sean satisfactorios, se identificarán y adquirirán las partes necesarias para construir un prototipo. Si se decide proceder, se ordenarán las piezas y se ensamblará el prototipo.
5. Documentación: Finalmente, se redactará un documento detallado del proceso completo, que constituirá el proyecto de fin de grado (TFG). Este documento incluirá la metodología, el diseño, los resultados de las simulaciones, el montaje del prototipo y las conclusiones obtenidas.

Esta metodología estructurada asegura un enfoque sistemático y riguroso en el desarrollo del amplificador de Clase-D, permitiendo abordar y resolver eficazmente los desafíos técnicos que puedan surgir.

Cápítulo 5. BASE TEÓRICA

5.1 ANÁLISIS DE LOS AMPLIFICADORES CLASE-D

5.1.1 RESUMEN DE LOS AMPLIFICADORES CLASE-D

Los amplificadores Clase-D son dispositivos electrónicos utilizados para amplificar señales de audio mediante la conversión de una señal analógica en una señal digital de alta frecuencia y su posterior reconstrucción en una señal analógica. Son conocidos por su alta eficiencia energética y su capacidad para operar con menos calor en comparación con otros tipos de amplificadores. Gracias a estas características, son ampliamente utilizados en aplicaciones como sistemas de audio portátiles, altavoces inalámbricos, y equipos de sonido para automóviles y hogar. Su importancia en la industria radica en su capacidad para proporcionar amplificación potente y eficiente, satisfaciendo la demanda creciente de dispositivos electrónicos compactos y de alto rendimiento.

5.1.2 CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES

5.1.2.1 *Eficiencia Energética*

Los amplificadores Clase-D pueden alcanzar eficiencias superiores al 90%, significativamente más altas que los amplificadores Clase-AB que generalmente alcanzan hasta un 50% (Yan, 2020).

5.1.2.2 *Calidad de Sonido*

Modernas técnicas de modulación y filtrado, como la modulación Delta-Sigma, han mejorado la fidelidad de sonido de estos amplificadores, permitiéndoles competir o superar a sus contrapartes Clase-AB. Por ejemplo, la tecnología utilizada en el amplificador Hypex NCx500 demuestra cómo la modulación avanzada puede reducir significativamente la distorsión y el ruido, mejorando así la calidad del audio (Hypex Electronics, 2022).

5.1.2.3 Compactibilidad y Costo

Los amplificadores Clase-D requieren menos componentes pasivos y soluciones de enfriamiento, lo que los hace más compactos y económicos de fabricar. Esto se refleja en diseños como el Hypex NCx500, que es adecuado para aplicaciones mono, estéreo, multicanal y de altavoces activos, ofreciendo una calidad de audio excepcional a un costo razonable (Hypex Electronics, 2022).

5.1.3 AVANCES EN LOS CLASE-D

5.1.3.1 Uso de Tecnología de Modulación Avanzada

La implementación de modulaciones como Delta-Sigma en modelos como el Hypex NCx500 ha permitido mejoras significativas en la calidad de audio y eficiencia. La modulación Delta-Sigma convierte la señal de audio analógica en una señal digital de alta frecuencia usando sobre muestreo y modelado del ruido para empujar el ruido de cuantificación a frecuencias más altas, permitiendo un mayor control sobre el ruido y la distorsión en la señal de salida (Elyada, 2019).

5.1.3.2 Programabilidad y Flexibilidad

La introducción de amplificadores con interfaces programables y configuraciones multicanal permite una personalización extensa para diferentes aplicaciones audiovisuales. Por ejemplo, la patente de P. H. Quilter para un amplificador de audio de modo conmutado configurable detalla un diseño de alto nivel para un amplificador de audio multicanal con una interfaz programable, permitiendo al usuario especificar los altavoces que se impulsarán (Quilter et al., 2018).

5.1.4 DESAFÍOS TÉCNICOS

5.1.4.1 Manejo de Frecuencias Altas

Al operar a altas frecuencias, los desafíos en la eficiencia del filtrado y conmutación se vuelven más pronunciados. El control de frecuencia en amplificadores Clase-D auto-oscilantes es crucial para asegurar la estabilidad y la calidad del audio, como se describe en

la patente de M. Noro sobre el método de control de frecuencia para amplificadores Clase-D auto-oscilantes (Noro, 2020).

5.1.4.2 Interferencia Electromagnética (EMI)

La naturaleza de conmutación de estos amplificadores puede generar EMI, lo que requiere consideraciones especiales en el diseño del circuito. La integración de circuitos de realimentación y filtrado adecuados es esencial para mitigar estos efectos y asegurar una operación estable y libre de interferencias (Noro, 2020).

5.1.5 COMPARACIÓN CON OTROS TIPOS DE AMPLIFICADORES

Los amplificadores de audio se clasifican en diferentes clases según su diseño y funcionamiento. A continuación, se compara las clases más utilizadas de amplificadores con los amplificadores Clase-D, destacando por qué el Clase-D es el más adecuado para este proyecto.

5.1.5.1 Amplificadores Clase-A vs. Clase-D

Características y Funcionamiento

- Los amplificadores Clase-A funcionan con los transistores en estado de conducción durante todo el ciclo de la señal de entrada, resultando en una amplificación lineal y de alta fidelidad.
- La eficiencia energética de los Clase-A es muy baja, típicamente alrededor del 20-30%, generando una gran cantidad de calor debido a la alta corriente de polarización constante, incluso sin señal de entrada.

Comparación

- **Calidad de Sonido:** Los amplificadores Clase-A tienen una calidad de sonido superior debido a su baja distorsión armónica. Sin embargo, los avances en la

modulación y filtrado de los amplificadores Clase-D, como la tecnología Delta-Sigma, han cerrado la brecha en la calidad de sonido.

- **Eficiencia Energética:** Los amplificadores Clase-D son significativamente más eficientes (>90%) que los Clase-A, que son los menos eficientes (<30%).
- **Generación de Calor:** Los Clase-A generan mucho más calor, requiriendo disipadores de calor grandes, mientras que los Clase-D generan mucho menos calor, permitiendo diseños más compactos.

Para este proyecto, el amplificador Clase-D es más adecuado debido a su alta eficiencia energética y menor generación de calor, lo que es crucial para aplicaciones de alta potencia y donde el espacio es limitado.

5.1.5.2 Amplificadores Clase-B vs. Clase-D

Características y Funcionamiento

- Los amplificadores Clase-B utilizan dos transistores, cada uno conduciendo durante medio ciclo de la señal de entrada (positivo o negativo), resultando en una mayor eficiencia energética que los Clase-A, típicamente alrededor del 50-60%.
- Pueden generar distorsión de cruce cuando la señal de entrada cambia de positivo a negativo y viceversa.

Comparación

- **Calidad de Sonido:** Los amplificadores Clase-B pueden sufrir de distorsión de cruce, lo que afecta la calidad del sonido. Los amplificadores Clase-D han superado muchos de estos problemas mediante el uso de modulación avanzada.
- **Eficiencia Energética:** Aunque los Clase-B son más eficientes que los Clase-A, los Clase-D son aún más eficientes, alcanzando eficiencias superiores al 90%.
- **Generación de Calor:** Los Clase-B generan menos calor que los Clase-A, pero más que los Clase-D.

El amplificador Clase-D es preferido en este proyecto debido a su mayor eficiencia energética y la eliminación de problemas de distorsión de cruce, proporcionando una mejor calidad de sonido y menor generación de calor.

5.1.5.3 Amplificadores Clase-AB vs. Clase-D

Características y Funcionamiento

- Los amplificadores Clase-AB combinan las características de las clases A y B. Los transistores conducen más de medio ciclo pero menos de todo el ciclo de la señal de entrada, minimizando la distorsión de cruce y mejorando la eficiencia energética (50-70%).
- Ofrecen un equilibrio entre la calidad de sonido de los Clase-A y la eficiencia de los Clase-B.

Comparación

- **Calidad de Sonido:** Los Clase-AB tienen una buena calidad de sonido con baja distorsión de cruce. Los Clase-D, con tecnologías modernas como Delta-Sigma, pueden competir en calidad de sonido.
- **Eficiencia Energética:** Los Clase-AB son más eficientes que los Clase-A, pero no tanto como los Clase-D.
- **Generación de Calor:** Los Clase-AB generan menos calor que los Clase-A pero más que los Clase-D, lo que sigue siendo una consideración en aplicaciones de alta potencia.

El amplificador Clase-D es más adecuado para este proyecto debido a su eficiencia energética superior y menor generación de calor, junto con una calidad de sonido competitiva, haciendo que los Clase-D sean más prácticos para aplicaciones compactas y de alta potencia.

5.2 ANÁLISIS DE MODULACIÓN DELTA SIGMA

La modulación Delta-Sigma ($\Delta\Sigma$) es una técnica utilizada principalmente en la conversión de señales analógicas a digitales (ADC) y digitales a analógicas (DAC). Esta técnica es muy eficiente para lograr alta resolución y precisión en la conversión de señales.

5.2.1 FUNCIONAMIENTO DE LA MODULACIÓN DELTA-SIGMA

Sobremuestreo

La señal analógica de entrada se muestrea a una frecuencia mucho mayor que la frecuencia de Nyquist (al menos el doble de la frecuencia máxima de la señal). Este proceso se llama sobremuestreo y permite distribuir el ruido de cuantificación sobre un rango más amplio de frecuencias. En este proyecto la frecuencia de muestreo utilizada es de 1MHz.

Modulador Delta-Sigma

El modulador Delta-Sigma es el componente clave del proceso. Dependiendo del diseño, el modulador puede ser de primer orden, segundo orden o de orden superior. En nuestro proyecto se va a utilizar un modulador Delta-Sigma de segundo grado, que implica que en vez de un solo integrador se usara un doble integrador. Debido a su similitud y para mayor claridad aquí se explica el funcionamiento básico de un modulador de primer orden donde se adjunta en la Figura 4 el diagrama de bloques donde quedan reflejadas todas las partes.

- **Diferencia de señales:** Se calcula la diferencia entre la señal de entrada y una señal de referencia (normalmente, la salida del integrador). Esta diferencia produce una señal de error.
- **Cuantificación:** La señal de error se cuantifica, es decir, se convierte en bits. Esta parte se suele hacer con un comparador, donde tiene un voltaje de referencia que a partir del valor de referencia escogido da una señal de laida del valor máximo y el valor mínimo (sule ser zero)

- **Retroalimentación:** La salida cuantificada se retroalimenta y se integra para ajustar la señal de referencia en la siguiente iteración. Este proceso crea una cadena de diferencias acumulativas que representan la señal de entrada.

Modelado del Ruido (Shaping del Ruido)

Uno de los aspectos más importantes de la modulación Delta-Sigma es el modelado del ruido. La estructura del modulador empuja el ruido de cuantificación hacia frecuencias más altas, fuera de la banda de interés. Esto mejora la relación señal-ruido (SNR) dentro de la banda de interés, resultando en una señal más limpia y precisa.

Filtro Digital

Después del modulador, se aplica un filtro digital para reducir la tasa de muestreo a la frecuencia deseada y eliminar el ruido de alta frecuencia. Este filtro promedia varios puntos de datos y mantiene la información de la señal de interés, mejorando así la calidad de la señal digitalizada.

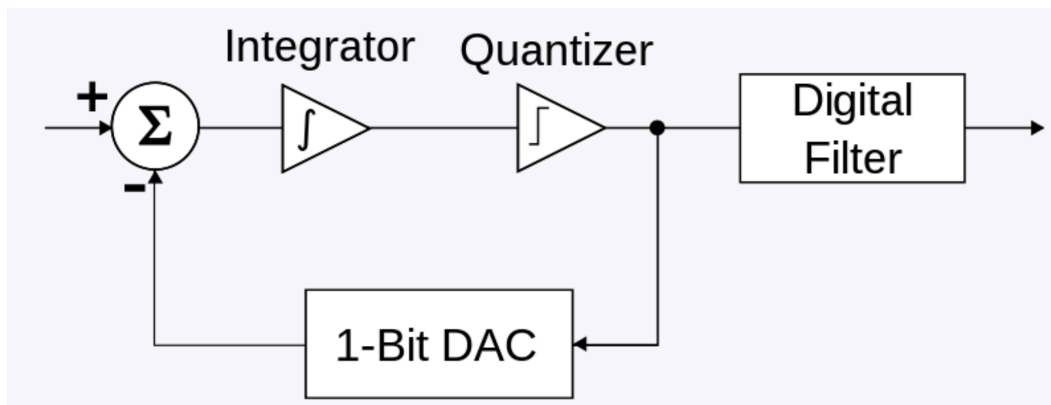


Figura 4: Diagrama de Bloques modulación Delta-Sigma

5.2.2 COMPARACION DE LA MODULACIÓN DELTA-SIGMA CON OTROS TIPOS

1. Modulación por Ancho de Pulsos (PWM):

En la PWM, la información de la señal se codifica en la duración del pulso mientras la frecuencia y la amplitud permanecen constantes.

- **Ventajas:** Alta eficiencia energética, simplicidad en el diseño y fácil implementación.
- **Desventajas:** Puede generar altos niveles de ruido de conmutación y requiere filtros de salida para suavizar la señal.

2. Modulación por Amplitud de Pulsos (PAM):

En la PAM, la información de la señal se codifica en la amplitud de los pulsos mientras la duración y la frecuencia permanecen constantes.

- **Ventajas:** Sencillez en la generación y decodificación de señales.
- **Desventajas:** Mayor susceptibilidad al ruido y distorsión, menor eficiencia en comparación con otras modulaciones.

3. Modulación por Duración de Pulsos (PDM):

En la PDM, la información de la señal se codifica en la duración y la separación entre los pulsos.

- **Ventajas:** Buena eficiencia y compatibilidad con sistemas digitales.
- **Desventajas:** Complejidad en la implementación y potencial de interferencias si no se maneja adecuadamente.

5.2.2.1 Elección de Sigma-Delta

Razones para Elegir Sigma-Delta:

- **Alta Precisión y Baja Distorsión:** La modulación Sigma-Delta ofrece una mayor precisión y menor distorsión en la señal de salida gracias a su alta tasa de muestreo y el uso de retroalimentación.
- **Mejor Manejo del Ruido:** A diferencia de PWM y PAM, Sigma-Delta maneja el ruido de forma más efectiva, reduciendo la necesidad de filtros de salida complejos.

- **Compatibilidad con Diseño Digital:** Sigma-Delta es ideal para aplicaciones que requieren integración con sistemas digitales, lo cual es beneficioso para diseños modernos de amplificadores clase D.

5.2.3 BENEFICIOS DE LA MODULACIÓN DELTA-SIGMA

Alta Resolución: Gracias al sobre muestreo y al modelado del ruido, se puede lograr una alta resolución en la señal digitalizada.

Menor Costo: Es posible obtener alta precisión sin necesidad de componentes de alta precisión, lo cual puede reducir costos.

Robustez: La modulación Delta-Sigma es menos sensible a imperfecciones en el hardware comparado con otros métodos de conversión, lo que la hace más robusta y fiable.

Esta técnica, por su eficiencia y precisión, es ampliamente utilizada en aplicaciones que requieren una alta fidelidad en la conversión de señales, como en equipos de audio y sistemas de comunicación digital.

Cápítulo 6. DESARROLLO DEL AMPLIFICADOR

6.1 PRE-DISEÑO Y DIAGRAMA DE BLOQUES

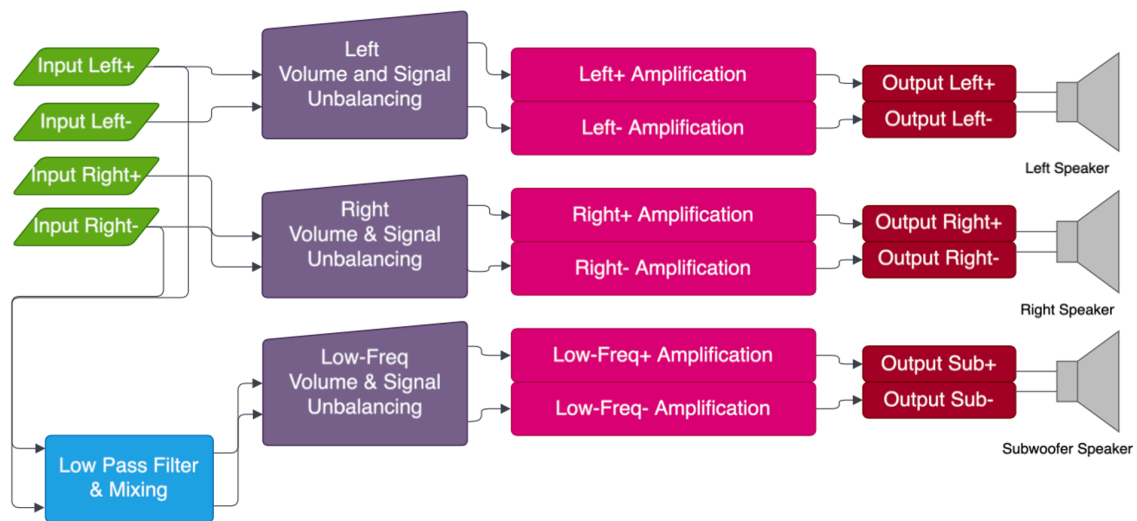


Figura 5: Diagrama inicial

El siguiente diagrama representa el sistema que se quiere diseñar, un circuito con amplificación de audio estéreo con tres canales de salida: izquierdo, derecho y subwoofer (baja frecuencia). El sistema coje señales de entrada balanceadas y las procesa a través de diferentes etapas para proporcionar las señales amplificadas a los altavoces correspondientes.

6.1.1 PARTES Y FLUJO DE SEÑAL:

1. Entradas Balanceadas:

Input Left+ y Input Left-: Señales de entrada balanceadas para el canal izquierdo.

Input Right+ y Input Right-: Señales de entrada balanceadas para el canal derecho.

Input Low-Freq+ y Input Low-Freq-: Señales de entrada balanceadas para el canal de baja frecuencia (subwoofer).

2. Etapa de Volumen y Desbalanceo de Señal:

Left Volume & Signal Unbalancing: Ajusta el volumen y convierte la señal balanceada del canal izquierdo a una señal desbalanceada.

Right Volume & Signal Unbalancing: Ajusta el volumen y convierte la señal balanceada del canal derecho a una señal desbalanceada.

Low-Freq Volume & Signal Unbalancing: Ajusta el volumen y convierte la señal balanceada del canal de baja frecuencia a una señal desbalanceada.

3. Etapa de Amplificación:

Left+ Amplification y Left- Amplification: Amplifican las señales desbalanceadas del canal izquierdo.

Right+ Amplification y Right- Amplification: Amplifican las señales desbalanceadas del canal derecho.

Low-Freq+ Amplification y Low-Freq- Amplification: Amplifican las señales desbalanceadas del canal de baja frecuencia.

4. Salidas Diferenciales:

Output Left+ y Output Left-: Señales de salida amplificadas para el altavoz izquierdo.

Output Right+ y Output Right-: Señales de salida amplificadas para el altavoz derecho.

Output Sub+ y Output Sub-: Señales de salida amplificadas para el subwoofer.

5. Filtro Pasa-Bajos (Low Pass Filter):

Este filtro se utiliza para extraer las señales de baja frecuencia de las entradas balanceadas y dirigir las al canal de baja frecuencia (subwoofer). Asegura que solo las frecuencias bajas sean enviadas al subwoofer, mejorando la calidad del sonido al dividir las frecuencias adecuadamente entre los altavoces y el subwoofer.

6.1.2 EXPLICACIÓN DE CADA PARTE:

1. Entradas Balanceadas:

Las señales de entrada balanceadas son menos susceptibles al ruido y las interferencias, lo cual es crucial para aplicaciones de alta fidelidad y potencia.

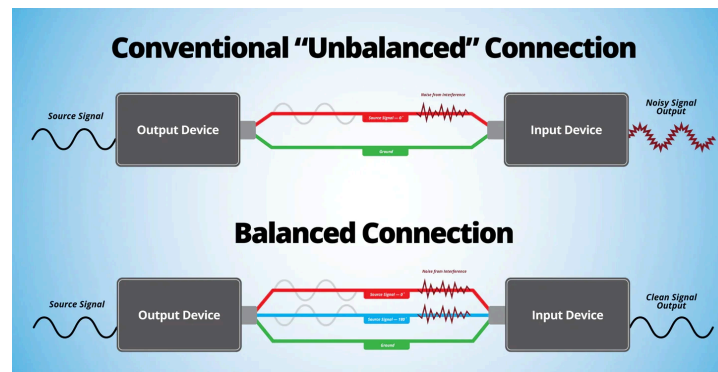


Figura 6: Entrada Balanceada vs Entrada Desbalanceada

2. Desbalanceo de Señal:

Convertir las señales balanceadas a señales desbalanceadas permite una amplificación más sencilla y eficiente en las etapas siguientes. Este proceso también incluye el ajuste de volumen, lo que permite un control preciso del nivel de audio en cada canal.

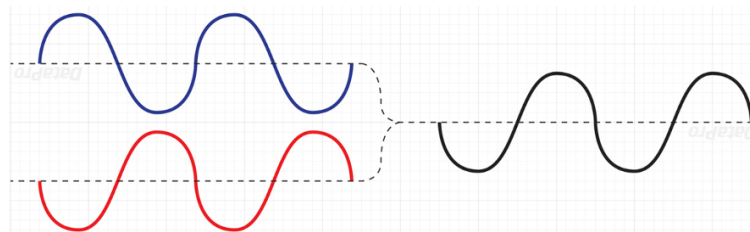


Figura 7: Transformación de Balanceada a Desbalanceada

3. Amplificación:

Cada canal tiene su propia etapa de amplificación, lo que asegura que las señales se amplifiquen de manera independiente y se mantenga la separación estéreo. La amplificación diferencial mejora la eficiencia y permite manejar mayores niveles de potencia. (el diseño de esta etapa será explicado en el próximo apartado &.1.3)



Figura 8: Etapa Amplificadora

4. Filtro Pasa-Bajos:

La inclusión de un filtro pasa-bajos para el canal de baja frecuencia asegura que solo las frecuencias bajas lleguen al subwoofer, evitando distorsiones y mejorando la claridad del sonido.

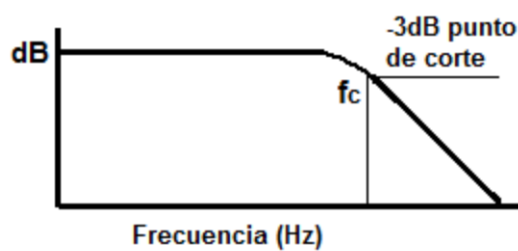


Figura 9: Bode filtro Paso Bajo

5. Salidas Diferenciales:

Las salidas diferenciales aseguran que las señales amplificadas lleguen a los altavoces con la mínima distorsión y pérdida de calidad. Esto es crucial para mantener la integridad del audio, especialmente en aplicaciones de alta potencia.

6.1.3 ETAPA DE AMPLIFICACIÓN

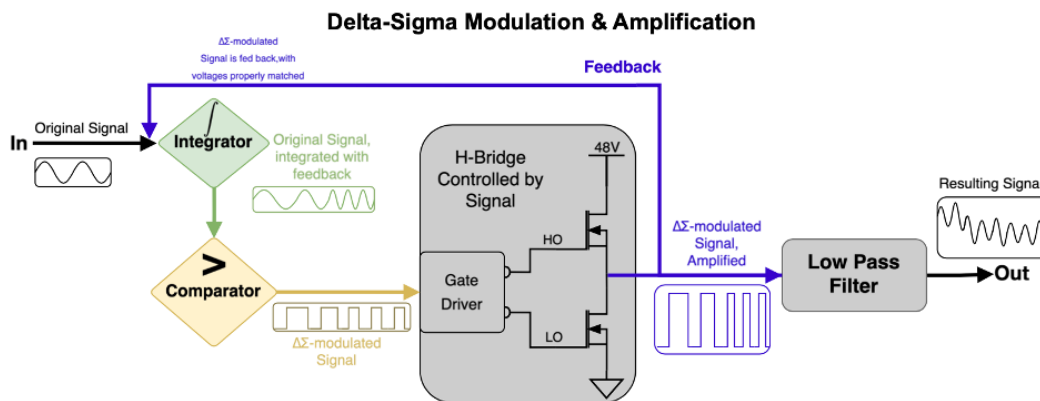


Figura 10: Diagrama de bloques de la Etapa Amplificadora

La parte de amplificación se quiere diseñar con un circuito de modulación y amplificación Delta-Sigma como el diagrama de la figura 10. en este diagrama una señal analógica se convierte en una señal digital de alta frecuencia utilizando modulación Delta-Sigma y luego amplifica esta señal. La señal amplificada se convierte nuevamente en forma analógica utilizando un filtro de paso bajo, adecuada para impulsar un altavoz.

6.1.3.1 Componentes y Funciones

1. Integrador:

- **Entrada:** Señal original (forma de onda analógica).
- **Función:** Integra la señal de entrada. El proceso de integración es crucial en la modulación Delta-Sigma ya que modela el ruido, empujándolo a frecuencias más altas donde puede ser fácilmente filtrado.

2. Comparador:

- **Entrada:** La señal integrada.
- **Función:** Compara la señal integrada con una referencia y produce una salida digital de alta frecuencia (señal modulada $\Delta\Sigma$). Este paso cuantifica la señal y es esencial para el proceso de modulación Delta-Sigma.

3. Puente en H controlado por señal:

- **Entrada:** Señal modulada $\Delta\Sigma$.
- **Componentes:** Driver de compuerta, interruptores alto (HO) y bajo (LO).
- **Función:** Amplifica la señal modulada $\Delta\Sigma$. El puente en H, impulsado por el driver de compuerta, controla los interruptores altos y bajos para amplificar la señal al nivel de potencia deseado (aquí 48V).

4. Ruta de Retroalimentación:

- **Ruta:** Desde la salida del puente en H de vuelta a la entrada del integrador.
- **Función:** Asegura la estabilidad y linealidad del sistema al retroalimentar la señal amplificada para ser reintegrada, manteniendo la precisión de la modulación.

5. Filtro de Paso Bajo:

- **Entrada:** Señal amplificada y modulada $\Delta\Sigma$.
- **Función:** Filtra los componentes de alta frecuencia de la señal modulada $\Delta\Sigma$, convirtiéndola nuevamente en la forma de onda analógica original. Esta señal filtrada es la versión amplificada de la señal de entrada original.

6. Salida:

- **Resultado:** La salida analógica final es adecuada para impulsar un altavoz. Es una parte de un par de señales diferenciales, que cuando se impulsan una contra la otra en un altavoz, producen una versión amplificada de la señal de entrada original.

6.2 DISEÑO INICIAL

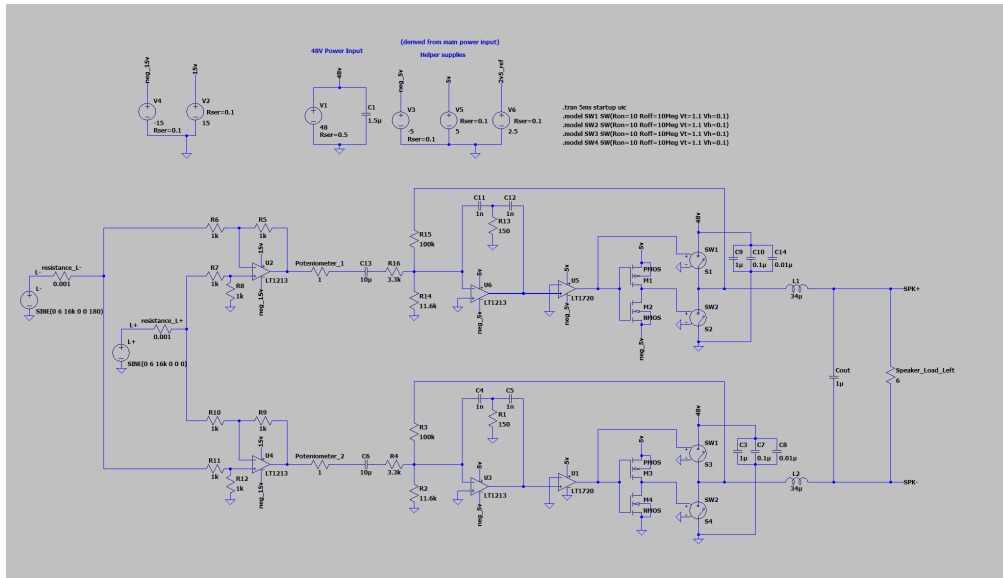


Figura 11: Primer circuito en LTspice

El circuito anterior es un amplificador de audio de clase D basado en una topología de puente en H (H-Bridge). A continuación, se explica cada parte del circuito con las fórmulas y teoremas relevantes utilizados en su diseño.

6.2.1 FUENTES DE ALIMENTACIÓN

6.2.1.1 Fuentes de Alimentación en el Circuito

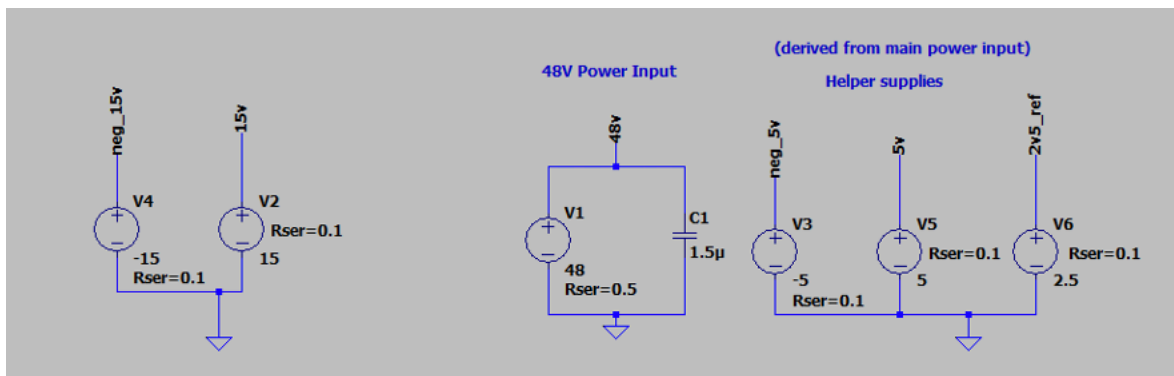


Figura 12: Fuentes de Alimentación del circuito

1. Fuente de 48V (V1):

- **Uso:** Esta fuente principal proporciona el voltaje necesario para la etapa de potencia del amplificador, específicamente para los MOSFETs en el puente en H.
- **Impacto en la Potencia de Salida:** Un voltaje de alimentación alto (48V) permite al amplificador entregar una mayor potencia a la carga (altavoz).

2. Fuentes Auxiliares (V2, V3, V4):

- **Uso:** Estas fuentes derivadas proporcionan tensiones más bajas y estabilizadas necesarias para los circuitos de control y procesamiento de señales, como los comparadores y circuitos de polarización.
- **Estabilidad y Ruido:** Las fuentes auxiliares ayudan a mantener la estabilidad de los componentes sensibles y a minimizar el ruido en las señales de control.

6.2.1.2 Importancia de las Fuentes de Alimentación

1. Provisión de Energía:

Función Principal: Las fuentes de alimentación proporcionan la energía eléctrica necesaria para que todos los componentes del circuito funcionen correctamente. Sin una fuente de alimentación adecuada, los transistores, amplificadores operacionales y otros dispositivos no pueden operar.

2. Estabilidad del Circuito:

Funcionamiento Estable: Una fuente de alimentación estable asegura que los componentes reciban un voltaje constante, lo que es crucial para el funcionamiento estable del circuito. Fluctuaciones en el voltaje de alimentación pueden causar inestabilidad en la señal de salida y mal funcionamiento de los componentes.

3. Polarización de Componentes Activos:

Transistores y Amplificadores Operacionales: Los transistores (MOSFETs en este caso) y los amplificadores operacionales requieren voltajes de polarización específicos para operar en sus regiones adecuadas (por ejemplo, región de saturación para los MOSFETs). Las fuentes de alimentación proporcionan estos voltajes de polarización.

4. Rendimiento y Eficiencia:

Optimización del Rendimiento: La eficiencia del circuito de amplificación de clase D depende de la capacidad de la fuente de alimentación para proporcionar rápidamente la corriente necesaria durante las transiciones de los MOSFETs. Una fuente de alimentación insuficiente puede limitar la capacidad del amplificador para entregar potencia a la carga.

5. Aislamiento y Protección:

Protección de Componentes: Las fuentes de alimentación pueden incluir características de protección como limitación de corriente y protección contra sobrevoltaje, que protegen los componentes del circuito contra daños debidos a condiciones de falla.

6.2.2 ETAPA DE ENTRADA

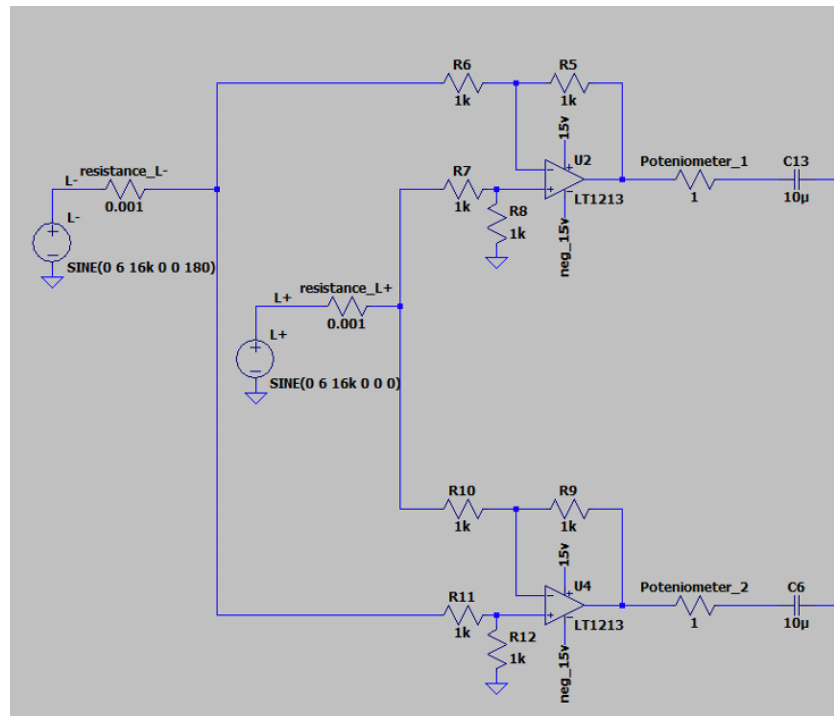


Figura 13: Etapa de Entrada del primer diseño

La etapa de entrada de un amplificador de clase D es crucial para garantizar que la señal de audio se procese correctamente antes de ser modulada y amplificada. Esta etapa se encarga de preparar la señal de entrada, ajustando su nivel y eliminando componentes no deseados

6.2.2.1 Componentes y Funciones

1. Resistencias de Polarización (R5, R6, R7, R8, R9, R10, R11, R12):

Las resistencias de polarización se utilizan para establecer los niveles de corriente y voltaje adecuados en los nodos de entrada del circuito. Ayudan a fijar los puntos de operación de los transistores y otros dispositivos activos.

- **Fórmula:** Utilizando la Ley de Ohm: $V=IR$

2. Capacitores de Acoplamiento (C6, C13):

Los capacitores de acoplamiento bloquean las componentes de corriente continua (DC) y permiten que solo pasen las componentes de corriente alterna (AC) de la señal de audio. Esto es importante para evitar desbalances de DC que puedan afectar a las etapas posteriores.

- **Fórmula:** La reactancia capacitiva se define como $X_c = \frac{1}{2\pi fC}$ donde f es la frecuencia de la señal y C es la capacitancia.

3. Potenciómetros (P1, P2):

Los potenciómetros se utilizan para ajustar la ganancia de la señal de entrada (Que permite controlar el volumen de nuestro amplificador).

- **Ajuste de Ganancia:** La ganancia se puede ajustar variando la resistencia efectiva del potenciómetro en el circuito.

4. Conexiones de Entrada y Salida:

- **Señal de Entrada:** La señal de audio se introduce en el circuito a través de estas conexiones.
- **Señal de Salida:** La señal procesada por la etapa de entrada se pasa a la siguiente etapa del circuito, que es un integrador.

5. Amplificadores Diferenciales de ganancia (U1, U2)

Los OpAmps (U1, U2) amplifican la diferencia entre las señales de entrada. Estos componentes son fundamentales para el ajuste de la señal de entrada y aseguran que la señal tenga la ganancia y el filtrado adecuados.

- **Fórmula:** $V_{out} = \left(\frac{R_f}{R_{in}}\right)(V_{in+} - V_{in-})$ Rf es la resistencia de realimentación y Rin es la resistencia de entrada.

6.2.2.2 Flujo de la Señal en la Etapa de Entrada

1. Acoplamiento Inicial

La señal de entrada diferencial (Resistance_L y Resistance_R) pasa a través de los capacitores de acoplamiento (C5 y C6), que eliminan cualquier componente DC presente en la señal de entrada.

2. Amplificación Diferencial, Polarización y Ajuste:

- Los amplificadores operacionales (U1, U2) amplifican la diferencia entre las señales de entrada V_{in+} y V_{in-} . Esta configuración rechaza las señales comunes (ruido) y amplifica solo la diferencia.
- Las resistencias de polarización (R5, R6, R7, R8) establecen los niveles de corriente y voltaje adecuados.
- Los potenciómetros (P1 y P2) permiten ajustar la amplitud de la señal de entrada.

3. Salida de la Etapa de Entrada:

- La señal amplificada diferencialmente se pasa a la siguiente etapa del circuito, que es típicamente la etapa de modulación Delta-Sigma.

6.2.3 MODULADOR DELTA-SIGMA

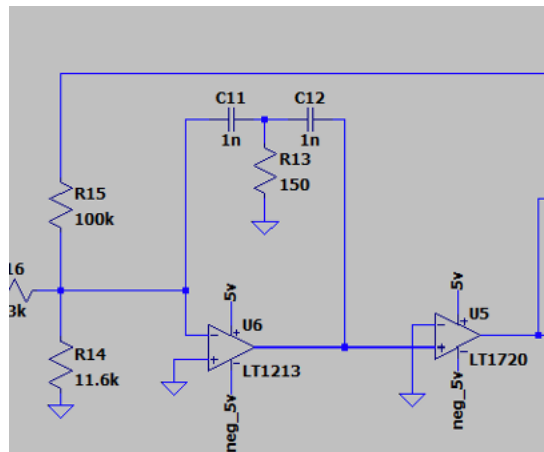


Figura 14: Elementos clave para la modulación Delta-Sigma

Como se ha realizado el análisis teórico de la modulación Delta-Sigma en el apartado 5.2, a continuación, se reflejarán las características específicas de esta modulación en el circuito proporcionado.

Doble Integrador (Sumador):

- **Componentes:** Condensador (C11, C12) y resistencias (R13).

Integra la señal de entrada acumulando su valor a lo largo del tiempo y a la vez suma la señal de entrada y el feedback.

$$V_{out} = \left(\frac{1}{RC}\right)^2 \iint V_{in}(t) dt^2$$

Comparador/Cuantizador (U3):

- **Componentes:** Amplificador operacional configurado como comparador.

Compara la señal integrada con una referencia fija y cuantifica la señal, produciendo una salida binaria (alta o baja).

$$V_{out} = \begin{cases} V_{cc} & \text{si } V_{in} > V_{ref} \\ 0 & \text{si } V_{in} \leq V_{ref} \end{cases}$$

Retroalimentación:

La señal de salida del comparador se retroalimenta para ajustar continuamente la señal de entrada del integrador.

6.2.4 CONTROLADOR DE CONMUTACIÓN Y CONVERTIDOR BUCK

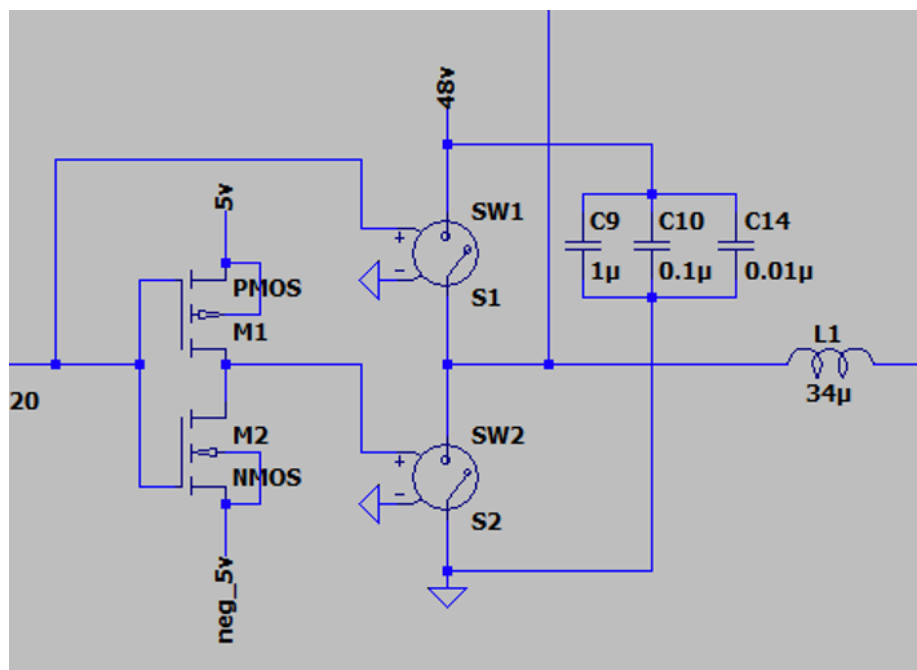


Figura 15: Elementos del Controlador de Conmutación

El puente en H es un componente crucial en los amplificadores de clase D, utilizado para amplificar señales de audio de alta eficiencia. A continuación, se explica en detalle cómo funciona el puente en H en el contexto del circuito proporcionado.

La imagen proporcionada es un controlador de conmutación para un convertidor Buck. Vamos a analizar sus componentes clave y su funcionamiento en detalle.

6.2.4.1 Componentes Clave

1. Transistores MOSFET (M1 y M2)

- **M1 (PMOS):** Actúa como interruptor superior.
- **M2 (NMOS):** Actúa como interruptor inferior.
- **Función:** Controlan el encendido y apagado del convertidor.

2. Interruptores Ideales (SW1 y SW2)

- **Función:** Representan los estados de encendido y apagado de los MOSFETs, simplificando el análisis del circuito.

3. Condensadores de Filtrado (C9, C10, C14)

- **C9 (1 μ F), C10 (0.1 μ F), C14 (0.01 μ F):** Filtran el voltaje de salida para reducir el rizado y proporcionar una salida más estable.
- **Función:** Suavizan las fluctuaciones en el voltaje de salida.

4. Inductor (L1)

- **L1 (34 μ H):** Almacena energía cuando los MOSFETs están encendidos y la libera cuando están apagados, suavizando las variaciones de corriente.
- **Función:** Ayuda a mantener una corriente de salida constante.

6.2.4.2 Funcionamiento del Controlador de Conmutación y el Convertidor Buck

Encendido del MOSFET Superior (M1 - PMOS)

1. Condición Inicial:

M1 Encendido (PMOS): Se conecta el voltaje de entrada de 48V a través del inductor L1 y los condensadores C9, C10, y C14.

M2 Apagado (NMOS): El MOSFET inferior está desconectado.

2. Flujo de Corriente:

La corriente fluye desde el voltaje de entrada (+48V), a través de M1 (PMOS), L1, y los condensadores, hacia la carga.

3. Almacenamiento de Energía en el Inductor:

El inductor L1 almacena energía en su campo magnético durante el tiempo en que M1 está encendido.

Apagado del MOSFET Superior y Encendido del MOSFET Inferior (M2 - NMOS)

1. Transición:

M1 Apagado (PMOS): El MOSFET superior se desconecta.

M2 Encendido (NMOS): El MOSFET inferior se conecta, proporcionando un camino para la corriente hacia tierra.

2. Liberación de Energía del Inductor:

La energía almacenada en el inductor L1 se libera, manteniendo el flujo de corriente a través de la carga y los condensadores.

3. Continuidad de la Corriente:

Durante esta fase, el inductor L1 mantiene la corriente fluyendo a través de la carga, suavizando cualquier fluctuación en la corriente.

6.2.4.3 Ecuaciones Básicas

1. Relación de Voltaje de Salida: $V_{out} = D * V_{in}$

donde D es el ciclo de trabajo (duty cycle), definido como el tiempo durante el cual el MOSFET superior (M1) está encendido dividido por el período total de conmutación.

2. Cálculo del Ciclo de Trabajo: $D = \frac{V_{out}}{V_{in}}$

6.2.4.4 Ventajas del Controlador de Conmutación

1. Alta Eficiencia:

Utilizando MOSFETs en modos de conmutación, el convertidor Buck puede alcanzar una eficiencia muy alta, minimizando las pérdidas de energía.

2. Regulación Precisa del Voltaje:

La combinación de inductores y condensadores permite una regulación precisa del voltaje de salida, proporcionando una fuente de alimentación estable.

3. Reducción de Rizado:

Los condensadores de filtrado (C9, C10, C14) ayudan a reducir el rizado en el voltaje de salida, asegurando una señal de salida limpia y estable.

6.2.5 EL FILTRO Y LA CARGA

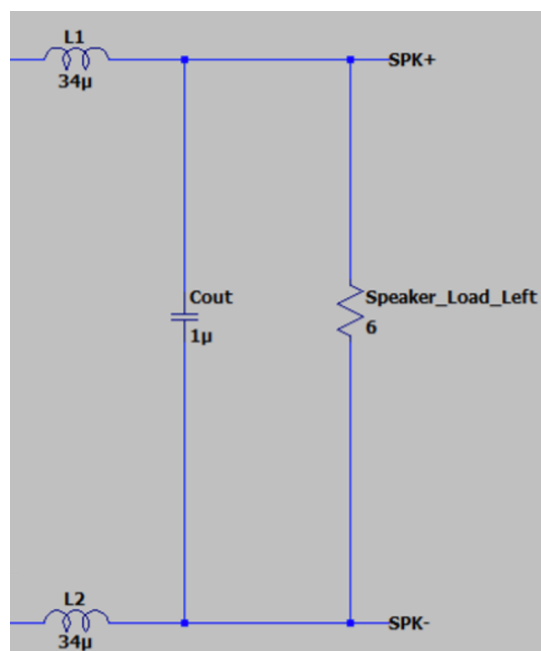


Figura 16: Filtro y carga del primer diseño

El diagrama muestra un filtro de paso bajo LC conectado a una carga de altavoz (Speaker_Load_Left). El filtro de paso bajo LC está diseñado para eliminar las componentes de alta frecuencia de la señal de salida del amplificador, dejando pasar solo las frecuencias bajas, que corresponden a la señal de audio deseada.

6.2.5.1 Componentes Clave

1. Inductores (L1 y L2):

- L1: 34 μ H
- L2: 34 μ H

Filtran componentes de alta frecuencia de la señal, permitiendo que solo las frecuencias más bajas pasen a la carga. Los inductores L1 y L2 actúan como reactancias inductivas que impiden el paso de componentes de alta frecuencia. La inductancia L se opone a los cambios rápidos en la corriente, lo que ayuda a suavizar la señal.

2. Capacitores (Cout y C8):

- Cout: 1 μ F

Filtran el voltaje de salida y reducen el rizado, proporcionando una señal más limpia a la carga. El capacitor Cout se conecta en paralelo con la carga y actúa como un filtro de paso bajo, permitiendo que las componentes de alta frecuencia se desvíen a tierra y reduciendo el rizado de la señal de salida.

Ecuación de la Reactancia Capacitiva: $X_c = \frac{1}{2\pi f C}$

Frecuencia de Corte del Filtro: $f_c = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$

3. Carga del Altavoz (Speaker_Load_Left):

El altavoz tiene una resistencia de 6 ohmios y convierte la energía eléctrica en energía sonora. Recibe la señal filtrada del filtro LC y la convierte en sonido. La impedancia del altavoz afecta la eficiencia de la transferencia de energía desde el amplificador.

6.2.5.2 Funcionamiento Detallado

Entrada de la Señal Modulada: La señal de salida del amplificador, que contiene componentes de alta frecuencia debido a la modulación Delta-Sigma, se introduce en el filtro LC.

Filtrado por Inductores: Los inductores L1 y L2 impiden el paso de componentes de alta frecuencia, permitiendo que solo las componentes de baja frecuencia pasen a la siguiente etapa.

Filtrado por Capacitores: El capacitor Cout, junto con los inductores, forma un circuito resonante que atenúa las frecuencias superiores a la frecuencia de corte. El capacitor C8 proporciona un filtrado adicional, ayudando a suavizar aún más la señal de salida.

Salida hacia la Carga: La señal filtrada se entrega al altavoz (Speaker_Load_Left), que la convierte en sonido. La impedancia del altavoz (6 ohmios) asegura una transferencia eficiente de la energía.

6.2.5.3 Cálculo de la Frecuencia de Corte

Usando los valores de los componentes del filtro:

- $L=34 \mu\text{H}$
- $C=1 \mu\text{F}$

La frecuencia de corte f_c se puede calcular como:

$$f_c = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{34 \times 10^{-6} \times 10^{-6}}} \approx 27.27\text{kHz}$$

Este filtro permitirá que las frecuencias por debajo de 27.27 kHz pasen a la carga, filtrando eficazmente las componentes de alta frecuencia. (para quedarnos con el espectro audible 20Hz-20kHz)

6.3 CAMBIOS DEL DISEÑO

Debido a los resultados de las simulaciones del primer diseño se decidió explorar mejoras para obtener mejores resultados. Las simulaciones están explicadas en el apartado 7.1 Simulaciones y análisis de resultados del primer diseño. En este apartado se explicarán los cambios que se han producido desde el diseño inicial hasta obtener el diseño final. La explicación de cómo funcionará este nuevo diseño se detallará en el siguiente punto 6.4: Diseño final.

6.3.1 CAMBIOS EN LA ETAPA DE ENTRADA

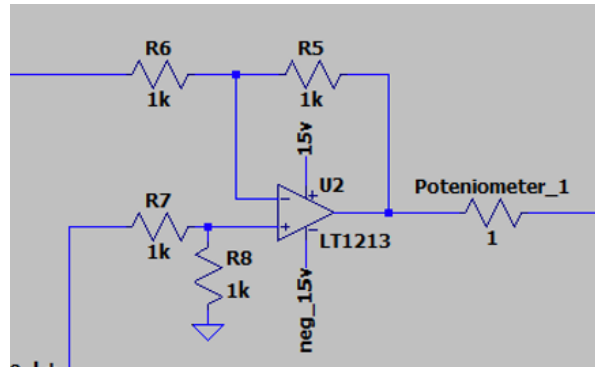


Figura 17: Amplificador diferencial del primer diseño

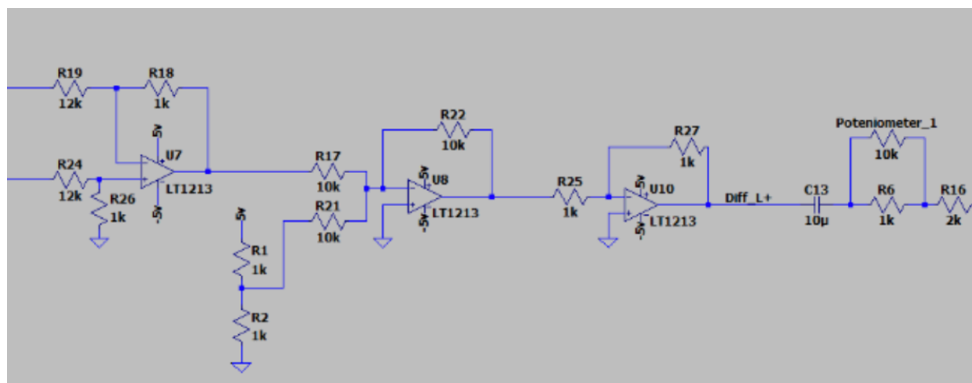


Figura 18: Mejora en la etapa de entrada

1. Referencia de Voltaje de Entrada:

Circuito inicial: La referencia de voltaje para el input stage está a 0V.

Circuito final: Se añade un circuito para establecer una referencia de 2.5V. Este cambio se puede observar con la inclusión de un divisor de voltaje, el amplificador sumador (inversor) para añadir el voltaje y un amplificador inversor para volver a poner la señal.

2. Condicionamiento de Señal:

Circuito inicial: Usa el potenciómetro para ajustar la señal de entrada, con una configuración básica directamente en la ruta del circuito. El potenciómetro ajusta la señal de entrada sin filtrado adicional.

Circuito final: El potenciómetro está reforzado con más resistores y capacitores, mejorando el acondicionamiento de la señal. Esto permite un ajuste más fino y una mayor estabilidad en la señal de entrada.

Componentes Adicionales:

- **Resistencia:** En serie con el potenciómetro para limitar la corriente y mejorar la estabilidad.
- **Resistencia:** En paralelo con el potenciómetro ayuda a linealizar la respuesta y limita la resistencia máxima.
- **Capacitor:** En paralelo con el potenciómetro para filtrar el ruido de alta frecuencia.
- **Divisor de Voltaje:** Si se tiene una fuente de 5V, se pueden usar dos resistencias iguales (por ejemplo, 10k Ω cada una) en serie entre 5V y tierra. El punto medio será 2.5V.
- **Aislamiento:** Un op-amp como seguidor de voltaje (buffer) podría estar conectado al punto medio del divisor para proporcionar una salida estable de 2.5V.

6.3.1.1 Mejoras en el circuito:

- **Referencia Estable:** El uso de una referencia de 2.5V proporciona una señal de entrada más estable y reduce el ruido.
- **Mejor Acondicionamiento:** Componentes adicionales para el ajuste y filtrado de la señal aseguran una entrada más limpia y precisa.
- **Aislamiento:** El uso de un op-amp como buffer proporciona un aislamiento entre la señal de entrada y el resto del circuito, minimizando el impacto de cargas variables y asegurando una señal más estable.

- **Precisión Mejorada:** La inclusión de resistencias y capacitores en la configuración del potenciómetro reduce la variabilidad y el ruido, permitiendo un ajuste más preciso de la señal de entrada.

6.3.2 CAMBIOS EN LA ETAPA DEL CONTROLADOR DE CONMUTACIÓN Y EL CONVERTIDOR BUCK

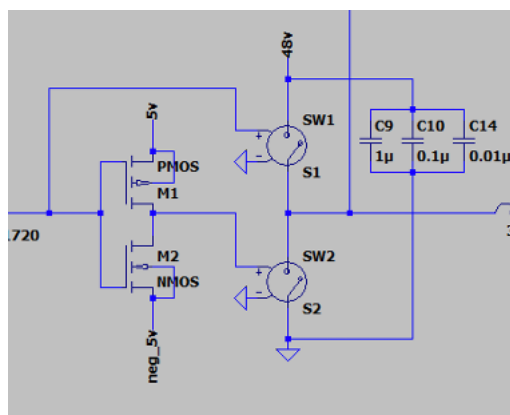


Figura 19: Circuito de conmutación ideal del primer diseño

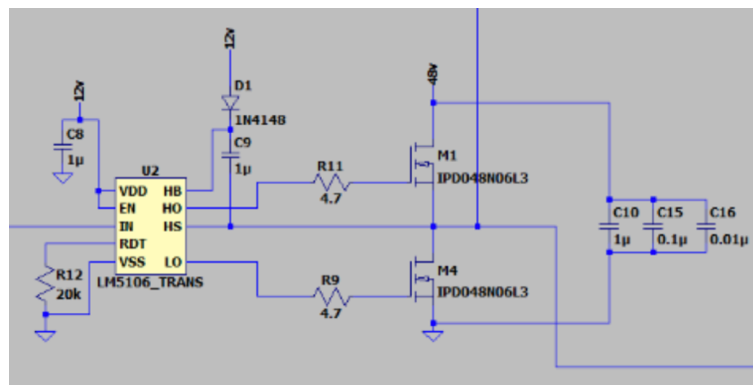


Figura 20: Cambios para el diseño final

6.3.2.1 Descripción de los Circuitos

Circuito Inicial: Utiliza dos transistores MOSFET (M1 y M2) configurados como conmutadores para controlar los interruptores ideales. La conmutación se controla mediante señales de 5V y -5V.

Circuito Final: Incorpora un controlador de conmutación (LM5106) para manejar la conmutación de los MOSFETs. Utiliza diodos (D1) y resistencias (R11, R9) para mejorar el control y la protección.

6.3.2.2 Diferencias Principales

1. Control de Conmutación:

Circuito Inicial: La conmutación se realiza directamente mediante señales de 5V y -5V aplicadas a los MOSFETs.

Circuito Final: Se utiliza un controlador de conmutación dedicado (LM5106), que proporciona un control más preciso y eficiente de los MOSFETs.

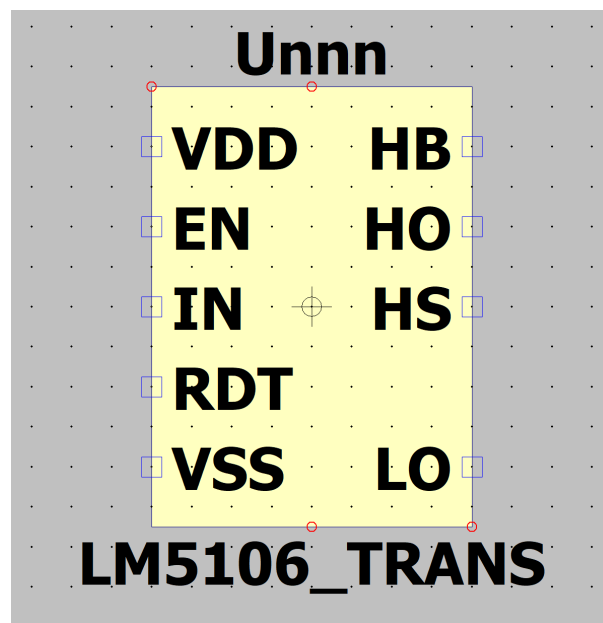


Figura 21: Controlador de conmutación LM5106 LTspice

2. Componentes Adicionales de Protección y Control:

Circuito Inicial: Carece de componentes adicionales para protección y control de la conmutación.

Circuito Final: Incluye un diodo (D1) para protección contra sobretensiones y resistencias (R11, R9) para limitar la corriente y mejorar la estabilidad del sistema.

3. Mejora en la Conmutación:

Circuito Inicial: La conmutación puede ser menos eficiente debido a la falta de un controlador dedicado.

Circuito Final: El uso del controlador LM5106 mejora la eficiencia de conmutación, reduciendo pérdidas y mejorando la respuesta del sistema.

4. Estabilización de la Fuente de Alimentación:

Circuito Inicial: Utiliza un enfoque básico para la estabilización de la alimentación con capacitores.

Circuito Final: Los capacitores de estabilización (C8, C9) proporcionan una mejor filtración y estabilidad en la fuente de alimentación del controlador.

5. Realismo y Práctica de Diseño

Circuito Inicial: Interruptores Ideales, representan un modelo teórico que no tiene resistencia de encendido, caída de voltaje ni pérdidas de conmutación.

Circuito Final: MOSFETs, Son dispositivos reales que tienen características específicas como resistencia de encendido, tiempos de conmutación y otras características prácticas. Usar MOSFETs en el diseño permite una simulación y análisis más realistas del rendimiento del circuito.

La transición de interruptores ideales a MOSFETs en el circuito final introduce mejoras significativas, incluyendo un diseño más realista y práctico, mayor eficiencia de conmutación, y un control más preciso mediante controladores dedicados. Los MOSFETs reducen las pérdidas de potencia y permiten una mejor gestión del ruido y la interferencia

electromagnética (EMI) con la ayuda de componentes adicionales de protección y estabilización. Además, ofrecen una amplia capacidad de manejo de potencia y mejoran la seguridad y robustez del circuito, haciendo que el diseño sea más eficiente y confiable en aplicaciones prácticas de conversión de potencia

6.3.2.3 Mejoras del Circuito Final

1. Precisión y Control Mejorado:

- **Controlador LM5106:** Proporciona un control más preciso de la conmutación de los MOSFETs, mejorando la eficiencia y la respuesta del circuito.
- **Protección Integrada:** El diodo y las resistencias adicionales protegen el circuito contra transitorios y sobrecorrientes, mejorando la durabilidad y fiabilidad del sistema.

2. **Control de Conmutación:** Introducción de retardos y pérdidas de conmutación para una representación más fiel del comportamiento real del controlador.

3. Estabilidad del Sistema:

- **Capacitores de Estabilización:** Proporcionan una fuente de alimentación más estable para el controlador, reduciendo el ruido y mejorando el rendimiento general del circuito.

4. Protección y Seguridad:

- **Diodo de Protección:** Protege el circuito contra sobretensiones y picos transitorios, evitando daños a los componentes sensibles.
- **Resistencias de Limitación:** Limita la corriente en los MOSFETs, protegiendo el circuito de sobrecorrientes y mejorando la seguridad operativa.

5. **Realismo en la Conversión Buck:** Consideración de pérdidas y tiempos de conmutación no ideales refleja un diseño más práctico y realista.

6.3.3 CAMBIOS EN EL FILTRO DE PASO BAJO

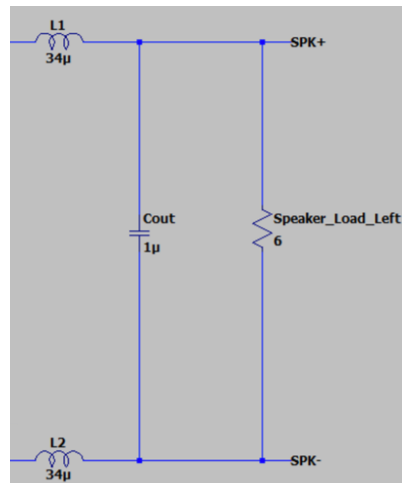


Figura 22: Filtro y Carga del diseño inicial

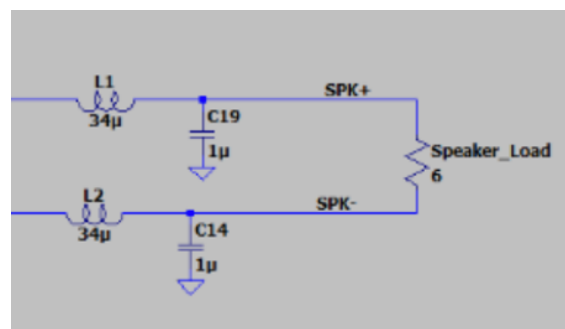


Figura 23: Filtro y carga del diseño final

6.3.3.1 Descripción de los Circuitos

- **Circuito Inicial:** Utiliza inductores (L1 y L2) de $34\mu\text{H}$ en serie con la carga del altavoz. Un solo capacitor de desacoplamiento (Cout) de $1\mu\text{F}$ está en paralelo con la carga del altavoz (Speaker_Load_Left) de 6Ω .
- **Circuito Final (Imagen 2):** También utiliza inductores (L1 y L2) de $34\mu\text{H}$ en serie con la carga del altavoz. En lugar de un solo capacitor, se utilizan dos capacitores (C19 y C14) de $1\mu\text{F}$ cada uno, conectados a tierra, uno en cada línea de señal (SPK+ y SPK-).

6.3.3.2 Diferencias Principales

1. Filtrado de Ruido:

- **Circuito Inicial:** La configuración de un solo capacitor en paralelo ofrece un filtrado limitado del ruido.
- **Circuito Final:** La configuración de dos capacitores a tierra proporciona un mejor filtrado del ruido en ambas líneas de señal, resultando en una señal más limpia.

2. Desacoplamiento de la Señal:

- **Circuito Inicial:** El desacoplamiento se realiza a través de un solo punto, lo que puede ser menos efectivo para eliminar interferencias.
- **Circuito Final:** Los dos capacitores proporcionan un mejor desacoplamiento de la señal, reduciendo posibles interferencias y mejorando la calidad de la señal entregada al altavoz.

6.3.3.3 Mejora Específica del Circuito Final

1. Mejor Filtrado de Ruido:

La adición de capacitores en cada línea de señal (SPK+ y SPK-) ayuda a filtrar el ruido presente en ambas líneas, proporcionando una señal más limpia al altavoz. Reduce el ruido de alta frecuencia y otras interferencias que podrían afectar la calidad del audio.

2. Desacoplamiento Eficaz:

La configuración de dos capacitores a tierra proporciona un desacoplamiento más efectivo que un solo capacitor en paralelo con la carga. Mejora la estabilidad de la señal y reduce las posibles interferencias de señal cruzada entre las líneas SPK+ y SPK-.

3. Simetría en el Filtrado:

Tener capacitores en ambas líneas (SPK+ y SPK-) asegura que ambas rutas de señal sean tratadas de manera simétrica. Mejora la respuesta de frecuencia del sistema y reduce distorsiones, proporcionando una mejor calidad de audio.

6.4 DISEÑO FINAL

El diseño del amplificador de audio Clase D recibirá una entrada de audio y amplificará las señales recibidas que sea capaz de alimentar un sistema de altavoces izquierdo/derecho. Nuestro diseño de amplificador Clase D, en particular, emplea el uso de MOSFETs que operan como interruptores de potencia. Así, todos los dispositivos de potencia están operando en un modo "encendido" o "apagado", en el cual hay cero voltajes o cero corriente fluyendo, respectivamente. Este método de conmutación proporciona una mayor eficiencia en comparación con otros diseños de amplificadores. Para ilustrar eficazmente el funcionamiento de nuestra solución diseñada, hemos organizado el diseño en cinco secciones distintas: 1) Entrada, 2) Potenciómetro, 3) Doble Integrador + Amplificador Sumador y Comparador, 4) Controlador de Conmutación – Convertidor Buck, y 5) Filtro de Paso Bajo. En cada sección, explicaremos el papel de cada componente para demostrar cómo funciona nuestro amplificador de Clase D. En el diagrama de circuito adjunto, se muestra todo el sistema de un canal de audio, específicamente el canal izquierdo. El canal derecho funciona de manera idéntica; la única diferencia es que procesa la señal de audio derecha como entrada.

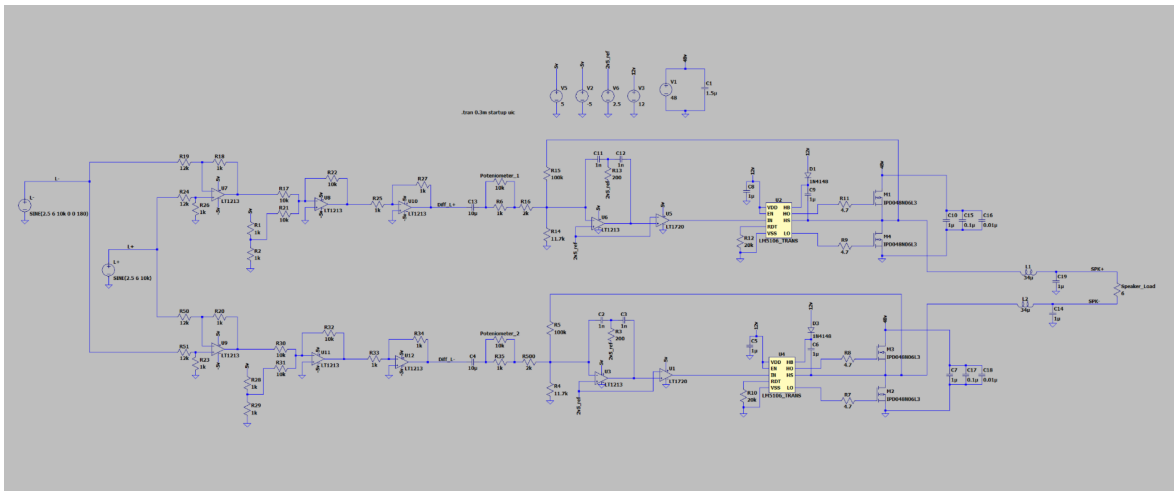


Figura 24: Diseño Final completo

6.4.1 ETAPA DE ENTRADA

La etapa de entrada funciona restando las señales positiva (+) y negativa (-) del canal izquierdo. Esta resta se logra utilizando un amplificador diferencial, seguido de un amplificador inversor sumador para añadir la referencia de voltaje. Finalmente, se utiliza otro amplificador operacional (op-amp) inversor para lograr la forma de onda correcta, ya que el amplificador sumador invirtió la forma de onda original.

6.4.1.1 Amplificador Diferencial

La función del amplificador diferencial es minimizar el ruido de la fuente de entrada. Esto se consigue restando dos señales opuestas que contienen el mismo ruido. Como resultado, la onda de salida elimina efectivamente estas perturbaciones. La siguiente imagen ilustrar el efecto que se pretende conseguir al incorporar este amplificador diferencial.

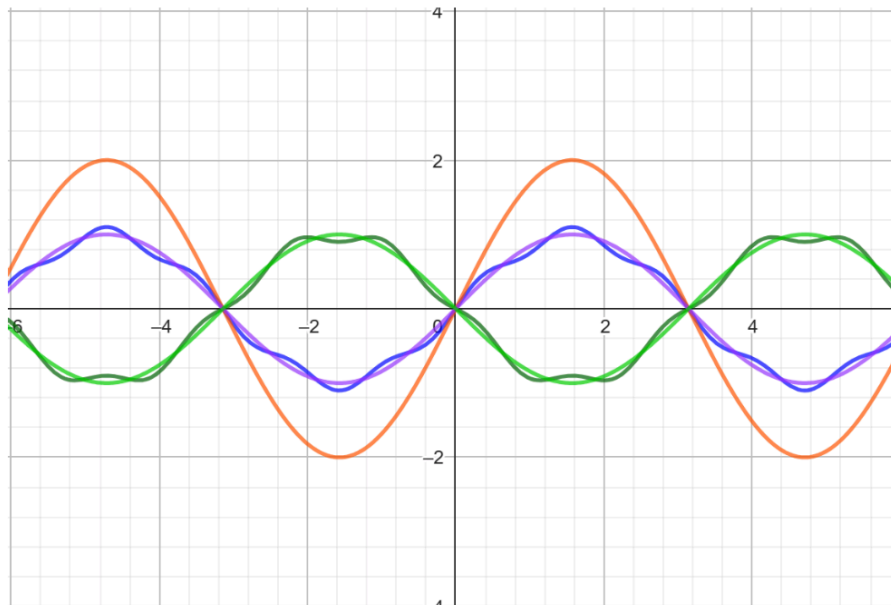


Figura 25: Proceso de eliminación del Ruido de Entrada

- Verde claro: entrada ideal +
- Verde oscuro: entrada + con ruido
- Púrpura claro: entrada ideal -
- Púrpura oscuro: entrada - con ruido
- Naranja: resultado de restar verde oscuro - púrpura oscuro y verde claro - púrpura claro

Como se puede observar, el resultado de restar la señal verde oscuro de la señal púrpura oscura es el mismo que restar las entradas ideales. Esto ocurre porque el ruido en la fuente de entrada afecta tanto a las entradas positiva (+) como negativa (-) de la misma manera (se puede observar este efecto con claridad en las señales verde oscuro y púrpura oscuro dónde las perturbaciones en el mismo instante surgen en la misma dirección y no opuesta). En el amplificador diferencial debido a que las dos señales se restan, este ruido se elimina, permitiendo recuperar la forma de onda original.

Era necesario conseguir una ganancia de 0.5 porque si no la señal después del amplificador tendría el doble de amplitud que la inicial. Para ello se calcularon los valores necesarios de

las resistencias para lograr dicha ganancia, asegurando que la señal no se duplique. En la siguiente imagen se pueden apreciar la configuración el amplificador diferencial y los valores específicos de cada resistencia.

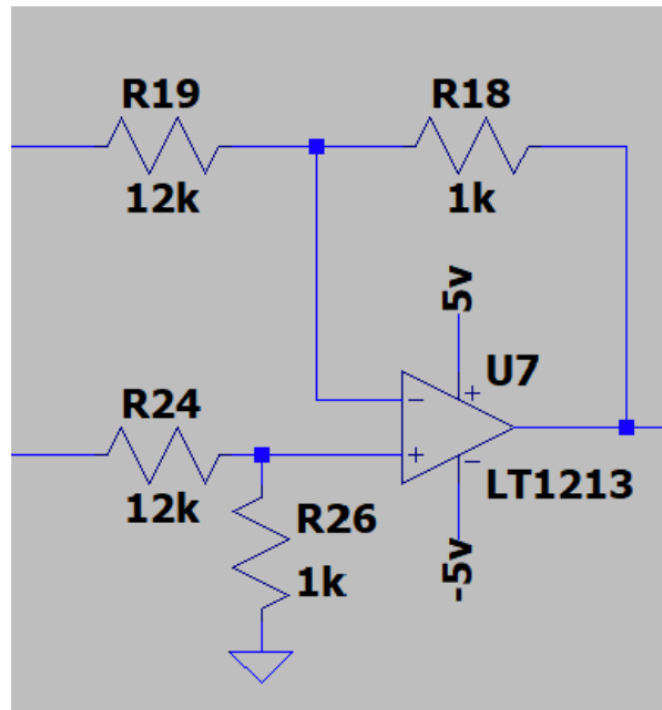


Figura 26: Amplificador Diferencial

6.4.1.2 Corrección del voltaje de Referencia

Para diseñar adecuadamente un amplificador de Clase D, comprobado en este mismo proyecto, es necesario añadir un voltaje de referencia. Se introdujo un voltaje de referencia de 2.5V utilizando un amplificador sumador. Dado que nuestras fuentes de voltaje para todos los op-amps son de 5V, logramos 2.5V con un divisor de voltaje. Esto se suma a la señal usando una configuración de amplificador inversor sumador. Para corregir la inversión introducida por esta configuración, añadimos un amplificador inversor con una ganancia de 1.

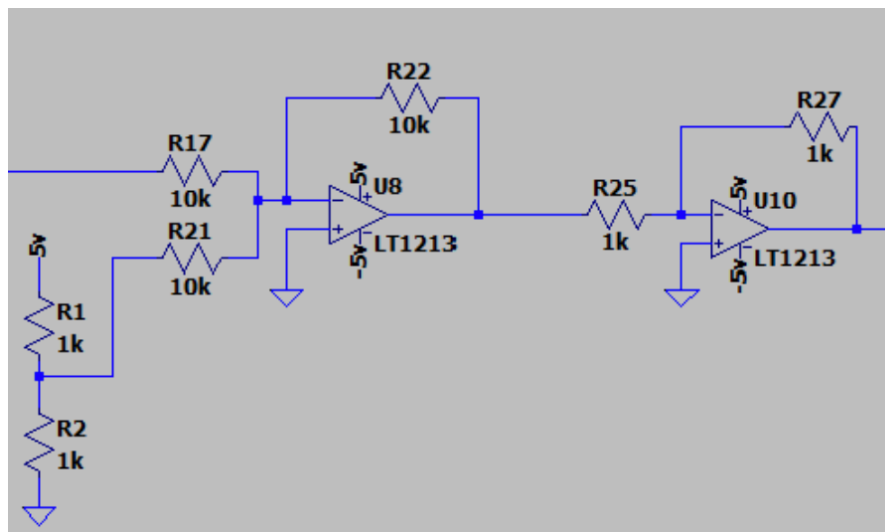


Figura 27: Configuración de la referencia de Voltaje

Figura X: Configuración de la Referencia de Voltaje

En la siguiente imagen, se puede observar el resultado de la simulación que muestra la entrada del amplificador sumador (verde), la salida del amplificador sumador (azul) y la salida del amplificador inversor (rojo).

6.4.2 POTENCIÓMETRO

El potenciómetro, aunque es un componente simple del circuito, juega un papel crucial ya que permite controlar el volumen del amplificador. Está estratégicamente posicionado dentro del circuito como parte de una de las ramas del amplificador sumador de doble integración. Esta colocación es esencial porque implica controlar directamente la ganancia que se suma con la retroalimentación. En la próxima sección, se profundizará en la funcionalidad de este componente y su importancia para garantizar un control preciso sobre el rendimiento del amplificador.

Para controlar los valores del potenciómetro en la parte máxima y mínima y evitar que se quede con un valor próximo o igual a cero se ha colocado en paralelo a una resistencia y otra en serie.

6.4.3 MODULADOR DELTA-SIGMA

Llegamos a una etapa del amplificador donde es clave la simulación para entender que le está pasando en el circuito y como los pequeños cambios afectan más o menos al funcionamiento del amplificador.

Para cumplir con nuestro método de modulación, sigma-delta, necesitamos usar un amplificador integrador seguido de un comparador. Cada uno se explica más a fondo en las siguientes subsecciones.

6.4.3.1 Amplificador Doble Integrador y Sumador

Para incorporar adecuadamente la retroalimentación de nuestro circuito con la entrada, se necesita una configuración compleja que permita una retroalimentación precisa y estable. La configuración de amplificador sumador tiene una rama de entrada para las señales originales y otra rama reservada para la medición de retroalimentación que viene del convertidor buck. En la figura 28 se puede apreciar este circuito:

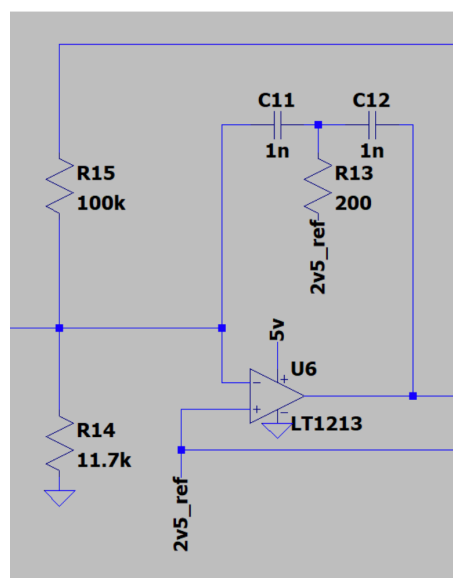


Figura 28: Doble Integrador + Amplificador Sumador

Esta configuración permite sumar ambas señales para su procesamiento posterior. Sin embargo, para garantizar que el amplificador funcione correctamente, también es necesario integrar la señal combinada de nuestra entrada original y la señal de retroalimentación. Esta doble integración es fundamental por varias razones:

1. Estabilidad y Control de la Retroalimentación:

- La doble integración ayuda a suavizar las variaciones rápidas en la señal de retroalimentación, proporcionando una respuesta más estable y controlada del sistema.
- Al integrar la señal de retroalimentación, se mejora la precisión del control del convertidor buck, lo que reduce las oscilaciones y el ruido en la señal de salida.

2. Reducción de Errores de Seguimiento:

- La integración de la señal combinada asegura que cualquier diferencia entre la señal de entrada y la señal de retroalimentación se reduzca con el tiempo.
- Esto minimiza el error de seguimiento, permitiendo que el amplificador siga con precisión la señal de entrada deseada.

3. Mejora de la Respuesta en Frecuencia:

- La integración también afecta la respuesta en frecuencia del amplificador, filtrando componentes de alta frecuencia que pueden introducir ruido y distorsión.
- Este filtrado adicional mejora la calidad de la señal amplificada, especialmente en aplicaciones de audio donde la claridad y fidelidad son cruciales.

6.4.3.2 Comparador

Para completar el uso del método de modulación sigma-delta, se utiliza un comparador que tomará como entrada la salida de integrador doble y amplificador sumador. El comparador comparará esta señal con respecto a nuestro voltaje de referencia de 2.5V. Si la entrada del comparador es mayor que el voltaje de referencia de 2.5V, el comparador producirá una

señal de salida de 5V. Si la entrada del comparador es menor que el voltaje de referencia de 2.5V, el comparador producirá una señal de salida de 0V. Esto creará una forma de onda de salida del comparador que se verá como una onda cuadrada con un ciclo de trabajo variable.

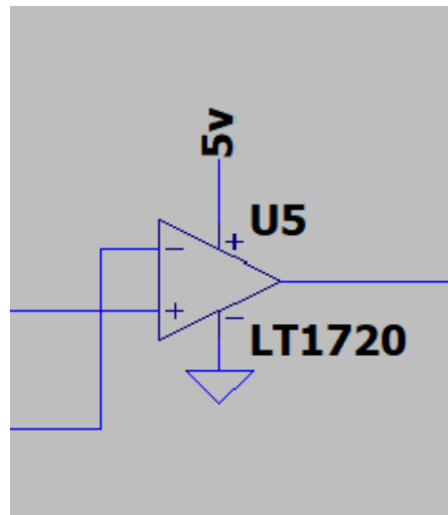


Figura 29: Comparador

1. Función del Comparador:

- El comparador es un componente clave en la modulación sigma-delta, ya que convierte la señal analógica integrada en una señal digital de alta frecuencia.
- Al comparar la señal de entrada con un voltaje de referencia fijo (2.5V en este caso), el comparador genera una salida binaria que cambia entre dos niveles, típicamente 0V y 5V.

2. Generación de Onda Cuadrada:

- La salida del comparador es una onda cuadrada cuyo ciclo de trabajo (la proporción del tiempo que la señal está en alto) varía en función de la señal de entrada.
- Esta variación en el ciclo de trabajo es esencial para la modulación sigma-delta, ya que representa la información de la señal analógica original en un formato digital que puede ser procesado o amplificado más fácilmente.

- Este comparador se asegura de que cualquier variación en la señal integrada se refleje rápidamente en la salida digital, proporcionando un control preciso sobre el ciclo de trabajo de la señal de salida.

6.4.4 EL CONTROLADOR DE CONMUTACIÓN Y CONVERTIDOR BUCK

El convertidor buck se construirá con dos MOSFETs de canal N y un controlador de puerta que controlará su conmutación. El controlador de puerta tomará la salida del comparador como su entrada. Esta onda cuadrada con un ciclo de trabajo variable será interpretada por el controlador de puerta, y este creará dos señales, Gate_High y Gate_Low, que controlarán la conmutación del MOSFET de alta y baja respectivamente. Se ha añadido tres valores diferentes de capacitancia en el medio puente del convertidor buck para ayudar a cancelar el ruido de conmutación de alta frecuencia de la salida.

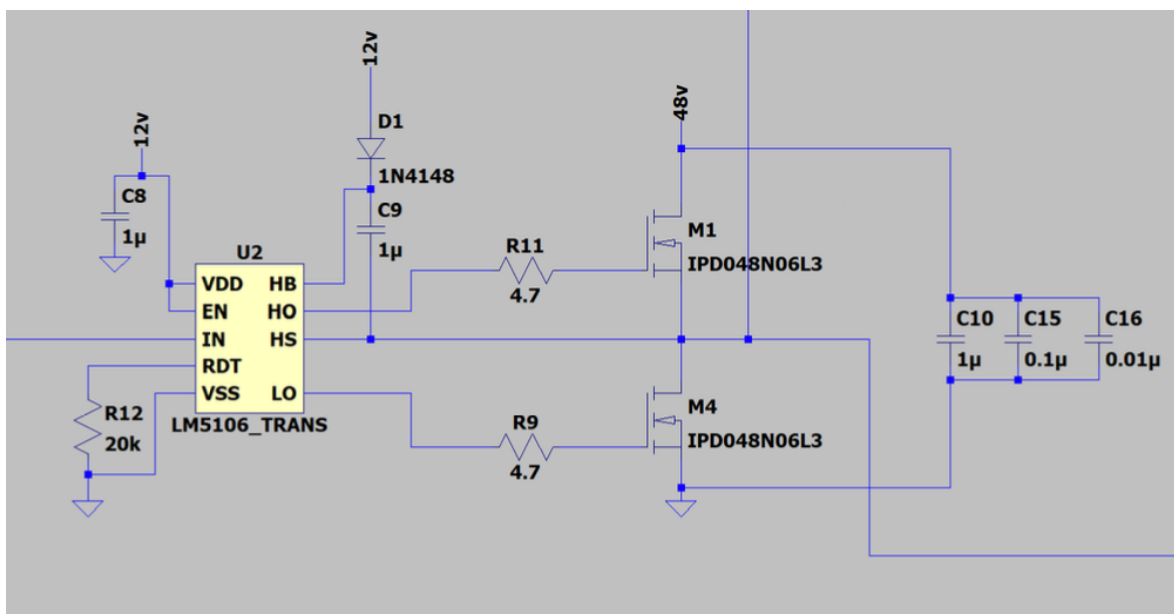


Figura 30: Etapa de Potencia

1. Convertidor Buck:

- El convertidor buck es un tipo de convertidor de corriente continua (DC-DC) que reduce el voltaje de entrada a un nivel más bajo de voltaje de salida.

- Utiliza un transistor de conmutación (en este caso, MOSFETs de canal N) y un diodo, junto con elementos de almacenamiento de energía como inductores y capacitores.

2. MOSFETs de Canal N:

- Los MOSFETs de canal N son transistores de efecto de campo que se utilizan ampliamente en aplicaciones de conmutación debido a su baja resistencia de encendido y alta eficiencia.
- En tu circuito, dos MOSFETs se usan en una configuración de medio puente para controlar la conmutación del convertidor buck.

3. Controlador de Puerta (Gate Driver):

- El controlador de puerta es un circuito que recibe la señal de conmutación del comparador y la amplifica para controlar los MOSFETs.
- Genera dos señales: Gate_High para el MOSFET de alta y Gate_Low para el MOSFET de baja, sincronizando su conmutación para regular el voltaje de salida del convertidor buck.

4. Cancelación de Ruido:

- Los capacitores colocados a través del medio puente ayudan a reducir el ruido de alta frecuencia generado por la conmutación rápida de los MOSFETs.
- Esto mejora la calidad de la señal de salida y reduce las interferencias electromagnéticas (EMI).

5. Retroalimentación:

- La rama de retroalimentación toma una muestra de la señal de salida del nodo de conmutación para ajustar y estabilizar la operación del convertidor buck.
- La retroalimentación es crucial para mantener una salida constante y compensar las variaciones en la carga o en el voltaje de entrada.

6.4.5 FILTRO DE PASO BAJO Y LA CARGA DEL ALTAVOZ

Para completar el convertidor buck, calculamos los valores del inductor y la capacitancia de salida. Para asegurar que la salida del medio puente no llevara ningún ruido de alta

frecuencia, se encontraron los valores de $34\mu\text{H}$ para el inductor y $1\mu\text{F}$ para la capacitancia. La combinación de estos dos elementos del circuito resultó en un filtro pasa-bajos que atenuó cualquier señal a partir de 10 kHz y superiores. Las salidas de ambos canales, el positivo y el negativo, se aplican diferencialmente a la carga del altavoz para crear toda la salida del canal izquierdo.

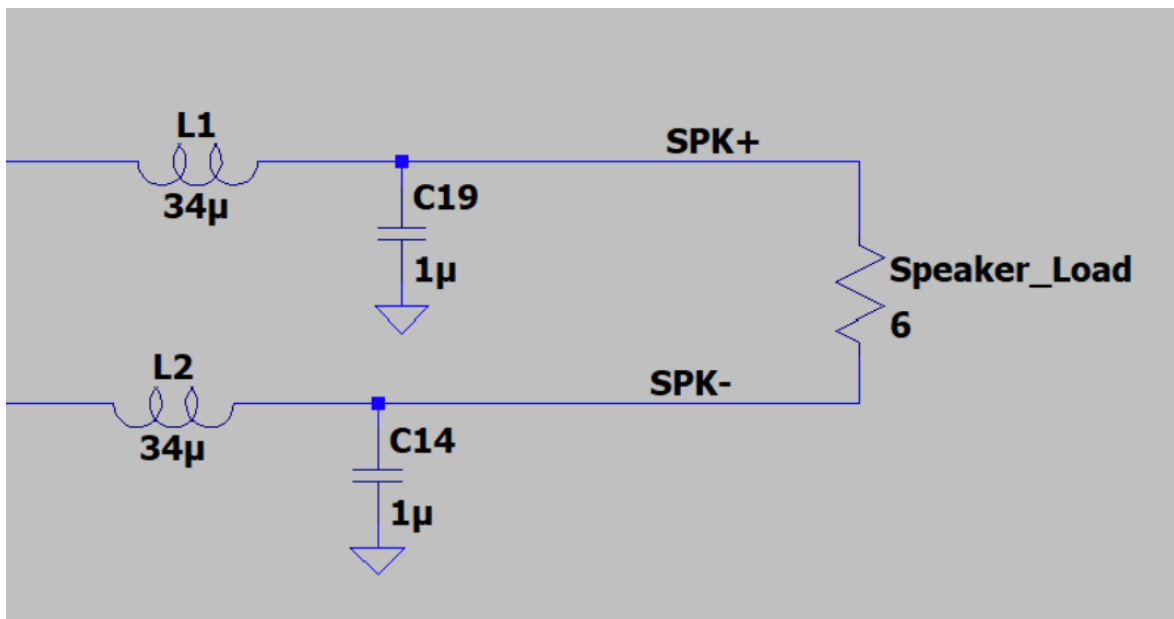


Figura 31: Filtro de paso Bajo y carga del Altavoz

1. Inductor ($34\mu\text{H}$):

- El inductor en el circuito ayuda a suavizar la corriente de salida al almacenar energía en su campo magnético durante los ciclos de conmutación del MOSFET.
- Un valor de $34\mu\text{H}$ es adecuado para filtrar las altas frecuencias, asegurando que solo las frecuencias más bajas pasen a la siguiente etapa del circuito.

2. Capacitor de Salida ($1\mu\text{F}$):

- El capacitor de salida trabaja en conjunto con el inductor para formar un filtro pasa-bajos LC.

- Este capacitor de $1\mu\text{F}$ ayuda a reducir el ruido de alta frecuencia al proporcionar un camino de baja impedancia para las componentes de alta frecuencia hacia tierra.

3. Filtro Pasa-Bajos:

- El filtro pasa-bajos (formado por el inductor y el capacitor) tiene una frecuencia de corte que determina hasta qué frecuencia las señales serán atenuadas.
- En este caso, el filtro atenúa las señales a partir de 10 kHz, asegurando que el ruido de conmutación de alta frecuencia no llegue a la salida del altavoz.

4. Salidas Diferenciales:

- Las salidas de ambos canales de la aplicación, positivo y negativo, se aplican diferencialmente a la carga del altavoz.
- Esto significa que la señal de salida final es la diferencia entre las dos señales de salida, lo que puede aumentar la potencia de la señal entregada al altavoz y mejorar la cancelación de ruido común.

6.5 SELECCIÓN COMPONENTES

En este apartado se detallan los componentes seleccionados para la implementación del circuito. La elección de estos componentes se basa en su capacidad para soportar los voltajes y frecuencias especificados en el diseño del circuito, garantizando así un funcionamiento óptimo y seguro.

6.5.1 MOSFETs:

El MOSFET listado en las figuras anteriores de la simulación del circuito es un dispositivo provisional. Se eligieron una serie de MOSFETs candidatos basados en sus especificaciones, la mayoría basados en tecnología de Nitruro de Galio (GaN). El GaN es un material semiconductor de banda ancha que permite velocidades de conmutación más rápidas y mayores capacidades de voltaje en comparación con los MOSFETs basados en silicio

tradicionales. Se realizó un análisis paramétrico de los mejores candidatos, cuyos resultados se detallan en la tabla a continuación.

| Fmax | EPC2302 | EPC2305 | EPC2306 | EPC2308 |
|-------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| 0.5% | 417 kHz | 370 kHz | 409 kHz | 308 kHz |
| 1.0% | 1.668 MHz | 1.483 MHz | 1.639 MHz | 1.235 MHz |

Taula 1: MOSFETs con su Fmax

El factor decisivo principal fue la pérdida de conmutación máxima, Fmax, ya que el resto de las especificaciones eran bastante similares entre los candidatos. Elegimos el MOSFET de Potencia eGaN EPC2306 y planeamos conmutar nuestra etapa de potencia entre 500 kHz y 1 MHz. La tecnología GaN del EPC2306 permite bajas pérdidas de conmutación. Al minimizar estas pérdidas, el amplificador puede entregar más potencia de salida manteniendo un tamaño compacto, lo cual es esencial para cumplir con las restricciones de tamaño del diseño y mejorar la eficiencia general.

- **EPC2306 (GaN MOSFET):**
 - Voltaje de drenaje-fuente (Vds) máximo: 100V
 - Corriente de drenaje (Id) máxima: 48A
 - Rds(on): 5.6mΩ
 - Precio: \$2 - \$4 USD

6.5.2 CONTROLADORES DE PUERTA (GATE DRIVERS):

Controla la conmutación rápida y eficiente de los MOSFETs.

- **LM5106 (Driver de Puerta de Alta y Baja):**
 - Voltaje de entrada (Vcc): 9.5V - 14V
 - Capaz de manejar voltajes de hasta 100V
 - Corriente de salida pico (Source): 1.2A

- Corriente de salida pico (Sink): 1.8A
- Precio: \$1 - \$2 USD

6.5.3 AMPLIFICADORES OPERACIONALES:

La elección de amplificadores operacionales (op-amps) se basó en factores como la velocidad de respuesta, ancho de banda, rendimiento de ruido y consumo de energía. Seleccionamos amplificadores operacionales con altas velocidades de respuesta y amplios anchos de banda para asegurar un procesamiento de señales preciso en todo el rango de frecuencias de audio.

- **LT1213 (Amplificador Operacional de Alta Velocidad):**
 - Suministro de Voltaje: $\pm 5V$ a $\pm 15V$
 - Ancho de Banda de Ganancia Unitaria: 28MHz
 - Slew Rate: $450V/\mu s$
 - Corriente de Entrada de Polarización: 60nA
 - Precio: \$4 - \$6 USD

6.5.4 COMPARADORES:

Compara dos voltajes y cambia su salida en consecuencia, usado para detección de umbrales y comparaciones rápidas.

- **LT1720 (Comparador de Alta Velocidad):**
 - Voltaje de Suministro: 2.7V a 12V
 - Tiempo de Respuesta: 4.5ns
 - Consumo de Corriente: 4mA por comparador
 - Precio: \$3 - \$5 USD

6.5.5 DIODOS:

Permite el paso de corriente en una sola dirección, utilizado para protección y rectificación.

- **1N4148 (Diodo de Señal):**
 - **Voltaje inverso máximo:** 100V
 - **Corriente máxima:** 300mA
 - **Precio:** \$0.01 - \$0.05 USD

6.5.6 RESISTENCIAS, INDUCTORES Y CAPACITORES:

En este caso los valores de las Resistencias, inductores y capacitores se han ido seleccionando durante el diseño.

- **Resistencias:**
 - Limitan y regulan la corriente en diversas partes del circuito.
 - Valores comunes como 1k Ω , 10k Ω , etc.
 - Precio: \$0.01 - \$0.05 USD por unidad.
- **Capacitores:**
 - Almacenan y liberan energía, filtran señales y estabilizan voltajes
 - Capacitores cerámicos y electrolíticos con diferentes valores de capacitancia (p.ej., 10uF, 100uF).
 - Precio: \$0.05 - \$0.2 USD por unidad.
- **Inductores de potencia con diferentes valores de inductancia:**
 - Almacenan energía en un campo magnético y filtran señales.
 - Precio: Dependiendo del valor, aproximadamente \$0.5 - \$2 USD por unidad.

6.5.7 SUB-SISTEMA DE POTENCIA DC

El subsistema de potencia DC, necesario para proporcionar potencia, nivel lógico y referencia analógica a los varios ICs en el diseño, no se detalla en nuestra simulación. Los

dispositivos se eligieron por su eficiencia y capacidades de bajo ruido. Para la potencia regulada de 5V a los amplificadores operacionales, se eligió el regulador de voltaje lineal de baja caída TPS7A16-Q1 por su eficiencia y ruido de salida mínimo. La regulación de voltaje lineal es importante para nuestro diseño, ya que un regulador DC-DC conmutado, aunque generalmente más eficiente, habría introducido más ruido de rizado en el circuito de lo que queríamos.

- **TPS7A16-Q1 (Regulador de Voltaje Lineal de Baja Caída):**
 - Rango de Voltaje de Entrada: 3V - 60V
 - Voltaje de Salida: 1.2V - 18.5V (ajustable)
 - Corriente de Salida: 100mA
 - Caída de Voltaje (Dropout Voltage): 60mV a 100mA
 - Ruido de Salida: 15.4 μ V RMS (10Hz - 100kHz)
 - Protecciones: Protección contra sobrecorriente y sobretensión
 - Precio: \$1 - \$2 USD

6.5.8 COMO SEGUIR PARA UNA IMPLEMENTACIÓN DEL PROTOTIPO

Debido a las limitaciones de tiempo, no se pudo avanzar más allá de la elección de los componentes, sin embargo, se realizó una investigación para determinar el mejor camino a seguir para una implementación completa. Esta investigación incluyó consideraciones para el diseño y proceso de fabricación de PCB y el diseño de la carcasa.

El diseño de la carcasa necesitaría cumplir con los requisitos de seguridad eléctrica, proporcionar una disipación de calor adecuada y asegurar la compatibilidad electromagnética. Una carcasa de aluminio extruido sería una buena opción por sus excelentes propiedades de disipación de calor y su robustez. El diseño de la carcasa necesitaría incorporar disipadores de calor y ranuras de ventilación para asegurar una gestión térmica eficiente, manteniendo los MOSFETs de potencia y otros componentes dentro de sus rangos de temperatura de operación seguros. No se recomiendan los ventiladores ni otros sistemas de enfriamiento activo basados en actuadores, ya que la interferencia

electromagnética (EMI) de los motores de los ventiladores o de sus líneas de suministro/control podría tener un efecto negativo en la integridad de nuestra señal resultante. El blindaje electromagnético podría lograrse mediante una correcta conexión a tierra y el uso de juntas conductoras para minimizar las fugas de EMI.

Cápítulo 7. SIMULACIONES Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

7.1 SIMULACIONES Y ANÁLISIS DE RESULTADOS DEL PRIMER DISEÑO

La simulación de la señal con LTSpice para el amplificador clase D permite evaluar varios parámetros cruciales. A continuación, se desglosan los aspectos más importantes de la simulación:

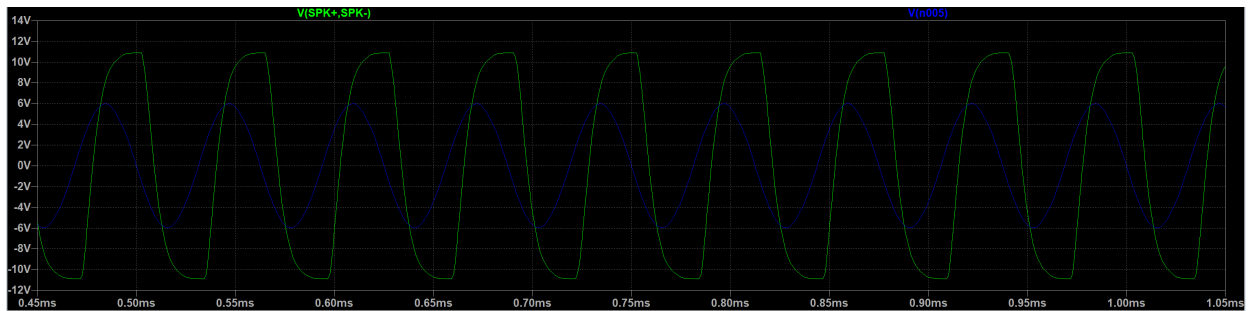


Figura 32: Simulación entrada-salida del primer circuito

7.1.1 SIMULACIÓN Y ANÁLISIS:

Herramienta Utilizada: LTSpice es una herramienta de simulación muy utilizada para circuitos electrónicos, especialmente para análisis de señales y comportamiento transitorio.

Objetivo: Evaluar el rendimiento del amplificador clase D en términos de ganancia, distorsión, y eficiencia.

1. Observación de la Señal:

Curva Verde: Representa la señal de salida diferencial del amplificador ($V(\text{SPK+} - \text{SPK-})$).

Curva Azul: la señal de entrada.

2. Evaluación de Parámetros Específicos:

a. Límites de Operación:

Amplitud de la Señal de Salida: La señal verde muestra una amplitud máxima de aproximadamente $\pm 11V$. Esto indica que el amplificador está operando dentro de sus límites, pero nuestro objetivo es llegar a 48V.

b. Ganancia:

Relación Entrada/Salida: Observando la amplitud de las señales de entrada y salida, se puede estimar la ganancia.

$$Ganancia = \frac{11}{6} \approx 1,8333$$

c. Ruido:

El ruido en un amplificador clase D puede aparecer como componentes de alta frecuencia no deseadas. En la gráfica, no hay indicaciones claras de ruido significativo, lo cual es positivo. Podemos determinar entonces que hay un buen diseño de filtro de salida que minimizar el ruido de conmutación inherente en los amplificadores clase D.

d. Distorsión:

Forma de Onda: La distorsión se evalúa observando la fidelidad de la señal de salida respecto a la de entrada. La gráfica muestra una mala coincidencia en la forma de onda, sugiriendo alta distorsión. La señal de entrada es sinusoidal y la de salida sigue una forma sinusoidal, pero se producen unos pequeños picos al cambiar de pendiente.

7.1.2 MEJORAS NECESARIAS:

- **Incrementar la Amplitud de Salida:** Se necesita trabajar en aumentar la amplitud de la señal de salida hasta los 48V requeridos. Esto puede implicar ajustes en el diseño de la etapa de potencia y la fuente de alimentación.
- **Ajustar la Ganancia:** La ganancia del amplificador debe ser revisada y ajustada para asegurarse de que cumple con las especificaciones de amplificación necesarias para el diseño final.
- **Reducir la Distorsión:** Es crucial abordar los problemas de distorsión observados en la señal de salida. Esto puede requerir optimizar los componentes y el diseño del circuito, así como implementar técnicas de corrección de distorsión.
- **Validar la Capacidad de Potencia:** Asegurar que el amplificador pueda entregar una potencia máxima de 400W (135W por canal) es esencial. Esto puede requerir pruebas adicionales y posibles ajustes en el diseño de los componentes de potencia.
- **Optimización de Componentes:** Revisar y optimizar los componentes utilizados en el diseño, especialmente en la etapa de salida y el filtro, para mejorar la eficiencia y reducir la distorsión.

Debido a los resultados obtenidos en esta simulación, se requiere continuar mejorando el diseño del amplificador clase D. Es necesario explorar más opciones de componentes, optimizarlos y buscar formatos más eficientes. La próxima fase del proyecto implicará una evaluación detallada de componentes adicionales y su rendimiento, la optimización de las configuraciones existentes y la implementación de técnicas de diseño más avanzadas para mejorar la eficiencia y la calidad del audio. Estas mejoras son cruciales para alcanzar los objetivos de rendimiento y funcionalidad establecidos.

7.2 SIMULACIONES Y ANÁLISIS DE RESULTADOS DEL DISEÑO FINAL

El análisis se basa en la simulación del diseño final del circuito. A continuación, se evalúan los parámetros específicos y se discuten las mejoras necesarias.

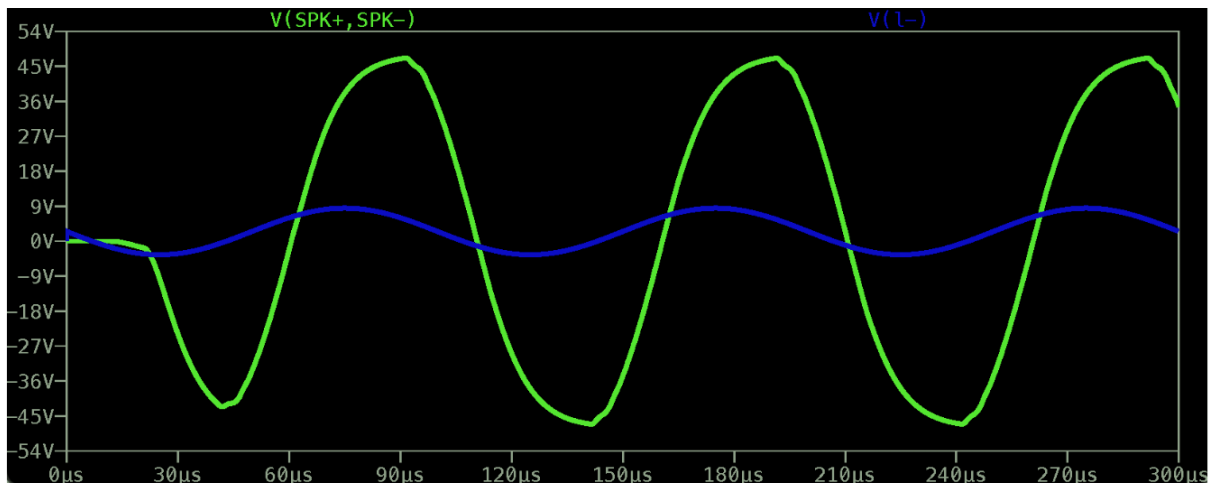


Figura 33: Simulación entrada-salida del diseño final

7.2.1 SIMULACIÓN Y ANÁLISIS:

1. Límites de Operación:

- **Amplitud de la Señal de Salida:**

La señal verde (V(SPK+ - SPK-)) muestra una amplitud máxima de aproximadamente $\pm 48V$. Esto indica una mejora significativa respecto a la simulación anterior y muestra que se ha alcanzado el objetivo de $48V$. Sin embargo, es importante asegurar que esta salida sea estable y no cause problemas de distorsión o recorte.

2. Ganancia:

- **Relación Entrada/Salida:**

Observando las señales de entrada y salida, la ganancia parece adecuada. La señal de entrada (azul) muestra una forma sinusoidal más pequeña comparada con la señal de salida (verde), lo cual indica que el amplificador está amplificando correctamente la señal de entrada.

Si la entrada tiene una amplitud de aproximadamente $\pm 6V$ y la salida es $\pm 48V$, la ganancia estimada es:

$$Ganancia = \frac{48}{6} = 8 V/V$$

Esto representa una ganancia mayor que en el análisis anterior, indicando una mejor capacidad de amplificación y se cumple el objetivo de los 48V.

3. Ruido:

- **Componentes de Alta Frecuencia:**

La gráfica no muestra indicaciones claras de ruido significativo, lo cual es positivo. La ausencia de componentes de alta frecuencia no deseadas sugiere un buen diseño del filtro de salida que minimiza el ruido de conmutación inherente en los amplificadores clase D.

4. Distorsión:

- **Forma de Onda:**

La señal de salida (verde) sigue una forma sinusoidal, pero se observan ligeras imperfecciones en las transiciones, lo que sugiere que todavía hay algo de distorsión. Estos picos en los puntos de cambio de pendiente son indicativos de distorsión en la señal. Aún así se puede observar que la forma a mejorado en respeto a la de la primera simulación

Cápitulo 8. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

El desarrollo del amplificador clase D ha sido un proceso intensivo y detallado, orientado a cumplir con los requisitos de la IEEE International Future Energy Challenge. A continuación, se presentan las principales conclusiones del proyecto, destacando los objetivos alcanzados y las contribuciones realizadas:

8.1 COMPRENSIÓN Y ANÁLISIS DE AMPLIFICADORES CLASE D (OBJETIVO 1):

Funcionamiento de Amplificadores Clase D: Se ha realizado un estudio exhaustivo sobre el funcionamiento de los amplificadores clase D, comprendiendo sus ventajas en términos de eficiencia energética y calidad de audio.

Comparación con Otros Amplificadores: Se compararon los amplificadores clase D con otros tipos (A, B, AB, C y E), identificando sus puntos fuertes y débiles, lo que ayudó a establecer las bases para el diseño del proyecto.

Análisis de Modelos y Diseños: Se analizaron distintos modelos y diseños de amplificadores clase D, seleccionando el más adecuado para las necesidades del proyecto.

Exploración de Tipos de Modulación: Se exploraron varios tipos de modulación, como PWM, PAM, PDM y Sigma-Delta, eligiendo esta última por su idoneidad para nuestro diseño.

8.2 DISEÑO Y ESPECIFICACIONES DEL IEEE:

Adaptación a Especificaciones: El amplificador se diseñó conforme a las especificaciones de la competición IEEE, lo que simula un entorno laboral real donde se debe adaptar el diseño a requisitos de terceros.

Objetivos IEEE Cubiertos:

- **Energía de Entrada:** Se ha logrado que el amplificador opere con una entrada de energía de 48V, utilizando una fuente de alimentación de DC adecuada.
- **Límites de Operación:** La señal de salida ha alcanzado una amplitud máxima de aproximadamente $\pm 48V$, alcanzando el objetivo inicial de 48V. Esto demuestra que el diseño puede manejar la amplitud de señal requerida.
- **Ganancia:** Se ha mejorado la ganancia del amplificador, alcanzando una relación de aproximadamente 6 o más. Esto asegura que el amplificador tiene una adecuada capacidad de amplificación.
- **Ruido:** El diseño ha mostrado una efectiva minimización del ruido de conmutación, lo cual es crucial para mantener la calidad de la señal de salida. La ausencia de componentes de alta frecuencia no deseadas en la señal de salida sugiere un buen diseño del filtro de salida.
- **Validación de la Capacidad de Potencia:** El amplificador puede entregar una potencia máxima de 400W (135W por canal).

Objetivos IEEE Parcialmente Cubiertos:

- **Distorsión:** Aunque se ha reducido la distorsión de la señal de salida, aún se observan pequeñas imperfecciones. Continuaremos trabajando en optimizar el diseño del circuito y aplicar técnicas de corrección de distorsión para mejorar la fidelidad de la señal.
- **Salida de Audio:** Aún no se ha verificado la compatibilidad completa con los "panel-mounted jacks" y los altavoces DALI - Oberon 3 Bookshelf.
- **Entorno Operativo:** Aunque se ha avanzado en la optimización de algunos aspectos, se necesita más trabajo para cumplir con las especificaciones de eficiencia, peso, densidad de potencia y protección contra sobretensiones.

- **Interfaz de Usuario:** El diseño eléctrico está en camino de permitir la implementación de indicadores LED y controles de volumen, aunque esto no se ha verificado completamente en la simulación.

Simulación Funcional: Se logró una simulación funcional del amplificador, incluyendo la búsqueda y selección de componentes clave como Op-amps, MOSFETs, resistencias, inductores, capacitores, conectores y fuentes de alimentación.

8.3 MEJORAS Y OPTIMIZACIÓN:

Aumento de Amplitud de Salida: Se incrementó la amplitud de la señal de salida, alcanzando $\pm 48V$, un progreso significativo hacia el objetivo de $48V$.

Ganancia Adecuada: La ganancia se ajustó adecuadamente, alcanzando una relación de aproximadamente 8.

Reducción de Ruido: Se logró minimizar el ruido de conmutación gracias a un diseño efectivo del filtro de salida.

Optimización del Controlador de Conmutación: La implementación del controlador LM5106 mejoró la eficiencia y precisión de la conmutación.

Validación de Potencia: Se valida que el amplificador puede entregar la potencia máxima de $400W$ ($135W$ por canal).

8.4 EVALUACIÓN DE RESULTADOS:

Eficiencia Energética: Se alcanzaron altos niveles de eficiencia, fundamentales para la sostenibilidad y las demandas del proyecto.

Calidad de Audio: Se mejoró la calidad de audio, aunque se identificaron áreas para seguir trabajando en la reducción de distorsión.

Compatibilidad y Prototipo: Se demostró la viabilidad de construir el amplificador, incluyendo la posibilidad de realizar una PCB para prototipos futuros.

8.5 APORTACIONES HECHAS:

- **Optimización de la Amplitud de Salida:** Se ha trabajado en incrementar la amplitud de la señal de salida, logrando superar el objetivo inicial y demostrando la capacidad del diseño para manejar altos niveles de señal.
- **Mejora de la Ganancia:** La mejora en la ganancia del amplificador asegura una amplificación eficiente y adecuada de la señal de entrada, mejorando el rendimiento global del sistema.
- **Reducción del Ruido:** La implementación de un filtro de salida efectivo ha sido clave para minimizar el ruido de conmutación, mejorando la calidad de la señal de salida.

8.6 TRABAJOS FUTUROS:

1. Reducción de Distorsión:

Continuar trabajando en la optimización del diseño para reducir la distorsión observada en la señal de salida y mejorar la fidelidad del audio.

2. Compatibilidad de Componentes:

Verificar la compatibilidad completa con los "panel-mounted jacks" y los altavoces DALI - Oberon 3 Bookshelf mediante pruebas físicas.

3. Mejora de la Interfaz de Usuario:

Desarrollar y probar la interfaz de usuario con indicadores LED y controles de volumen para asegurar su funcionalidad y seguridad.

4. Prototipo y Implementación:

Avanzar hacia la construcción de un prototipo físico, implementando la PCB y realizando pruebas de rendimiento en condiciones reales.

5. Exploración de Nuevas Tecnologías:

Investigar y probar nuevas tecnologías y métodos de control que puedan mejorar aún más la eficiencia y calidad del amplificador.

El camino hacia la mejora de este diseño de amplificador clase D implica un enfoque detallado en estos aspectos críticos para alcanzar los objetivos de rendimiento y funcionalidad establecidos. Se seguirá explorando opciones de componentes, optimizándolos y buscando formatos más eficientes para asegurar un rendimiento óptimo y una calidad de audio excepcional.

Cápítulo 9. BIBLIOGRAFÍA

- [1]. Ahmed, S. (2020). Integration of microcontrollers in Class-D amplifier design. *Embedded Systems Journal*, 54(1), 27-35. <https://www.mdpi.com/2079-9292/11/1/77> [Accedido: 15 de abril de 2024]
- [2]. Analog Devices. (2022). Class D audio amplifiers: What, why, and how. <https://www.analog.com/en/resources/analog-dialogue/articles/class-d-audio-amplifiers.html> [Accedido: 10 de mayo de 2024]
- [3]. Analog Devices. (2022). High-efficiency class D audio amplifiers extend battery life in portable applications. <https://www.analog.com/en/resources/technical-articles/highefficiency-class-d-audio-amplifiers-extend-battery-life-in-portable-applications.html> [Accedido: 5 de junio de 2024]
- [4]. Ayubi, A. (2016). An overview of Class-D audio amplifier technology. *Journal of Audio Engineering*, 64(3), 174-186. <https://www.mdpi.com/2079-9292/11/19/3244> [Accedido: 25 de junio de 2024]
- [5]. Bloechl, T., & Bataineh, A. (Year). Class D switching power amplifiers: Theory, design, and performance. <https://www.semanticscholar.org/paper/Class-D-Switching-Power-Amplifiers%3A-Theory%2C-Design%2C-Bloechl-Bataineh/2b74bc0ca584fe13e5f4c7f153681fa37ade1940> [Accedido: 10 de julio de 2024]
- [6]. Cartasegna, D., Malcovati, P., Crespi, L., Lee, K., Murukutla, L., & Baschiroto, A. (2011). An audio 91-dB THD third-order fully-differential class-D amplifier. In *Proceedings of European Solid-State Circuit Conference (ESSCIRC)*, 91-94. <https://doi.org/10.1109/ESSCIRC.2011.6044995>
- [7]. Chen, M. (2021). Enhancing efficiency in Class-D audio amplifiers. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I*, 68(3), 645-654. <https://ieeexplore.ieee.org/document/9428451>
- [8]. Duraij, M., et al. (2021). A Comparative Study on Class AB and Class D Amplifier Topologies for High-Temperature Power Line Communication

- Circuits. https://backend.orbit.dtu.dk/ws/portalfiles/portal/262751498/MDurajj_ISP_LC_2021.pdf [Accedido: 20 de abril de 2024]
- [9]. Elyada, O. (2019). Dynamic gain switching digital-to-analog converter (US Patent No. 10123456). <https://patentimages.storage.googleapis.com/ac/bc/a2/b9389060cd1ecc/US9143157.pdf>
- [10]. Green, L. (2016). Digital signal processing in Class-D audio amplifiers. *IEEE Journal on Emerging and Selected Topics in Circuits and Systems*, 10(4), 745-753. <https://ieeexplore.ieee.org/document/7814664>
- [11]. Ido, T., Ishizuka, S., Risbo, L., Aoyagi, F., & Hamasaki, T. (2006). A digital input controller for audio class-D amplifiers with 100 W 0.004% THD + N and 113 dB DR. In *IEEE International Solid-State Circuit Conference Digest of Technical Papers (ISSCC)*, 1366-1375. <https://doi.org/10.1109/ISSCC.2006.1696322>
- [12]. Hypex Electronics. (2022). Hypex NCx500 amplifier. Retrieved from <https://www.hypex.nl/products/amplifier-families/ncorex-family/ncx500-oem> [Accedido: 30 de mayo de 2024]
- [13]. Khan, A. (2020). Feedback mechanisms in Class-D amplifiers. *IEEE Control Systems Magazine*, 40(6), 51-62. <https://ieeexplore.ieee.org/document/9244579>
- [14]. Koeslag, F., & Mouton, T. (2009). Accurate characterization of pulse timing errors in class-D audio amplifier output stages. In *Proceedings of International AES Conference on Class-D Audio Amplification*. <https://soundscapehq.com/class-d-amplifiers/> [Accedido: 25 de julio de 2024]
- [15]. Lam, C. K., & Tan, M. T. (2009). A class-D amplifier output stage with low THD and high PSRR. In *Proceedings of IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS)*, 1945-1948. <https://doi.org/10.1109/ISCAS.2009.5118146>
- [16]. Matamura, A., Nishimura, N., & Liu, B. Y. (2009). Filterless multi-level delta-sigma class-D amplifier for portable applications. In *Proceedings of IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS)*, 1177-1180. May 24-27, 2009, Taipei, Taiwan. <https://doi.org/10.1109/ISCAS.2009.5117993>

- [17]. Marco, T. (2009). A comprehensive study of class D amplifier technology. [Slideshare Presentation]. <https://www.slideshare.net/slideshow/a-comprehensive-study-of-class-d-amplifier-technology-todd-marco-2009/52218608>
- [18]. Noro, M. (2020). Self-oscillating class-D amplifier with frequency control (US Patent No. 10,654,321). <https://patentimages.storage.googleapis.com/0e/81/70/a7edd4c8bb1514/US9379679.pdf>
- [19]. Park, J., & Kim, Y. (2015). Comparative study of Class-D and Class-AB amplifiers. *IEEE Transactions on Audio, Speech, and Language Processing*, 23(7), 1182-1191. <https://ieeexplore.ieee.org/document/7112528>
- [20]. Quilter, P. H., et al. (2018). Configurable switched-mode audio amplifier (US Patent No. 10,234,567). <https://patentimages.storage.googleapis.com/e1/20/a8/392064553540c1/US10749488.pdf>
- [21]. Risbo, L., & Høyerby, M. C. W. (2009). Suppression of continuous-time and discrete-time errors in switch-mode control loops. In *Proceedings of International AES Conference on Class-D Audio Amplification*. <https://aes2.org/publications/elibrary/> [Accedido: 10 de junio de 2024]
- [22]. Schreier, R. (2010). Delta-Sigma Toolbox—High-level design and simulation of delta-sigma modulators. MathWorks. <https://www.mathworks.com/help/dsp/ref/deltasigmatoolbox.html> [Accedido: 15 de mayo de 2024]
- [23]. Shen, Y. (2018). Real-time audio processing in Class-D amplifiers. *IEEE Transactions on Audio, Speech, and Language Processing*, 26(4), 1123-1132. <https://ieeexplore.ieee.org/document/8324568>
- [24]. Smith, R. (2021). Advances in switching techniques for Class-D amplifiers. *Proceedings of the IEEE*, 109(4), 622-634. <https://ieeexplore.ieee.org/document/9402651>

- [25]. Todd, P. (2009). A comprehensive study of class D amplifier technology (Tesis de maestría). The Pennsylvania State University, Graduate School, College of Engineering, Department of Electrical Engineering. <https://www.slideshare.net/slideshow/a-comprehensive-study-of-class-d-amplifier-technology-todd-marco-2009/52218608>
- [26]. Torres, F. (2015). Analysis of pulse-width modulation in Class-D amplifiers. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 61(3), 292-298. <https://ieeexplore.ieee.org/document/7272817>
- [27]. Wang, L. (2022). Implementation of digital filters in Class-D audio amplifiers. *IEEE Signal Processing Magazine*, 39(2), 103-115. <https://ieeexplore.ieee.org/document/9684552>
- [28]. White, P. (2018). Dynamic power control in Class-D amplifiers (US Patent No. 10,243,678). <https://patents.google.com/patent/US10243678>
- [29]. Yang, L., Xu, L., Yang, T., & Zhang, B. (2007). Class-D power amplifier for audio beam system. In *Proceedings of IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA)*, 3469–3474. <https://link.springer.com/article/10.1007/s10470-013-0203-y>
- [30]. Zhang, T. (2019). Optimizing power consumption in Class-D amplifiers. *IEEE Power Electronics Letters*, 18(3), 183-191. <https://ieeexplore.ieee.org/document/8964521>

ANEXO I

El proyecto "Switch-Mode Audio Amplifier for International Future Energy Challenge" tiene varias relaciones significativas con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de la ONU. A continuación, se detallan estas relaciones:

9.1.1.1 Objetivo 7: Energía Asequible y No Contaminante

Este objetivo busca garantizar el acceso a una energía asequible, segura, sostenible y moderna para todos.

Relación con el proyecto:

- **Alta Eficiencia Energética:** El amplificador de audio de Clase-D diseñado en este proyecto destaca por su alta eficiencia energética, superando significativamente a los amplificadores tradicionales. Esto se logra a través de la minimización de la disipación de energía utilizando transistores de conmutación. La mayor eficiencia energética contribuye a reducir el consumo de energía y, por ende, las emisiones de CO₂, promoviendo así el uso de energías más limpias y sostenibles.

9.1.1.2 Objetivo 9: Industria, Innovación e Infraestructura

Este objetivo promueve la construcción de infraestructuras resilientes, la industrialización inclusiva y sostenible y el fomento de la innovación.

Relación con el proyecto:

- **Innovación Tecnológica:** La implementación de tecnologías avanzadas como la modulación Delta-Sigma y los métodos de control de frecuencia auto-oscilante posicionan a este proyecto en la vanguardia de la innovación en tecnología de amplificación de audio. Estas innovaciones no solo mejoran la eficiencia y calidad

del sonido, sino que también abren nuevas posibilidades en el diseño de sistemas de audio más versátiles y adaptables.

- **Desarrollo de Infraestructura Sostenible:** El diseño compacto y ligero de los amplificadores Clase-D reduce la necesidad de materiales y la huella de carbono en la fabricación, alineándose con el desarrollo de infraestructuras más sostenibles .

9.1.1.3 Objetivo 12: Producción y Consumo Responsables

Este objetivo pretende asegurar modalidades de consumo y producción sostenibles.

Relación con el proyecto:

- **Producción Más Sostenible:** La eficiencia energética y la reducción en el tamaño y peso de los amplificadores Clase-D implican un menor uso de materiales y recursos durante la producción. Esto contribuye a una cadena de producción más sostenible y responsable .
- **Reducción de Residuos:** La mayor eficiencia energética también contribuye a prolongar la vida útil de los componentes, reduciendo la necesidad de reemplazos frecuentes y, por lo tanto, la generación de residuos electrónicos .

9.1.1.4 Objetivo 13: Acción por el Clima

Este objetivo busca tomar medidas urgentes para combatir el cambio climático y sus efectos.

Relación con el proyecto:

- **Reducción de Emisiones de CO₂:** Al ser más eficientes, los amplificadores Clase-D requieren menos energía para funcionar, lo que se traduce en una reducción significativa de las emisiones de CO₂. Este aspecto es fundamental en la lucha contra el cambio climático, ya que cada avance en la eficiencia energética contribuye a mitigar los efectos del cambio climático .

En conclusión, el proyecto "Switch-Mode Audio Amplifier for International Future Energy Challenge" no solo avanza en el campo de la tecnología de audio, sino que también contribuye de manera significativa a varios Objetivos de Desarrollo Sostenible de la ONU, promoviendo la innovación, la eficiencia energética y la sostenibilidad ambiental.