

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ

Colegio de Ciencias e Ingeniería

**Diseño e Implementación de Efectos de Guitarra Eléctrica
Basados en Amplitud de la Señal**

Juan Felipe Valdivieso Ubidia

Ingeniería Eléctrica y Electrónica

Trabajo de fin de carrera presentado como requisito
para la obtención del título de
Ingeniero Electrónico

Quito, 13 de diciembre de 2021

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ

Colegio de Ciencias e Ingeniería

HOJA DE CALIFICACIÓN DE TRABAJO DE FIN DE CARRERA

**Diseño e Implementación de Efectos de Guitarra Eléctrica
Basados en Amplitud de la Señal**

Juan Felipe Valdivieso Ubidia

Nombre del profesor, Título académico

Alberto Sanchez, PhD.

Nombre del profesor, Título académico

Nataly Pozo, MSc.

Quito, 13 de diciembre de 2021

© DERECHOS DE AUTOR

Por medio del presente documento certifico que he leído todas las Políticas y Manuales de la Universidad San Francisco de Quito USFQ, incluyendo la Política de Propiedad Intelectual USFQ, y estoy de acuerdo con su contenido, por lo que los derechos de propiedad intelectual del presente trabajo quedan sujetos a lo dispuesto en esas Políticas.

Asimismo, autorizo a la USFQ para que realice la digitalización y publicación de este trabajo en el repositorio virtual, de conformidad a lo dispuesto en la Ley Orgánica de Educación Superior del Ecuador.

Nombres y apellidos: Juan Felipe Valdivieso Ubidia

Código: 00140542

Cédula de identidad: 1718900291

Lugar y fecha: Quito, 13 de diciembre de 2021

ACLARACIÓN PARA PUBLICACIÓN

Nota: El presente trabajo, en su totalidad o cualquiera de sus partes, no debe ser considerado como una publicación, incluso a pesar de estar disponible sin restricciones a través de un repositorio institucional. Esta declaración se alinea con las prácticas y recomendaciones presentadas por el Committee on Publication Ethics COPE descritas por Barbour et al. (2017) Discussion document on best practice for issues around theses publishing, disponible en <http://bit.ly/COPETHeses>.

UNPUBLISHED DOCUMENT

Note: The following capstone project is available through Universidad San Francisco de Quito USFQ institutional repository. Nonetheless, this project – in whole or in part – should not be considered a publication. This statement follows the recommendations presented by the Committee on Publication Ethics COPE described by Barbour et al. (2017) Discussion document on best practice for issues around theses publishing available on <http://bit.ly/COPETHeses>.

RESUMEN

En este trabajo se presenta el diseño y construcción de dos efectos de guitarra eléctrica en forma de circuitos analógicos montados dentro de cajas metálicas. Se definen diferentes parámetros de diseño para integrar adecuadamente los circuitos en el sistema de una guitarra eléctrica común. Las topologías diseñadas son simuladas y medidas para comprobar las características de la amplitud de señal de las ondas de salida resultantes.

Palabras clave: Amplificador; Diseño de circuitos; Audio; Distorsión; Guitarra eléctrica; Señal.

ABSTRACT

This work presents the design and construction of two guitar signal effects in form of analog circuits mounted inside metal enclosures. Different design parameters are defined to integrate the circuits in the common signalpath of electric guitars. The designed circuit topologies are simulated and measured to prove the amplitude characteristics of the output signals.

Key words: Amplifier; Analog circuit design; Audio; Distortion; Electric guitar; Signal.

TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	11
2. CONCEPTOS BÁSICOS Y TOPOLOGÍAS DE DISEÑO	13
2.1 Source Follower	14
2.2 Amplificador No Inversor	15
3. DISEÑO	17
3.1 Pedal tipo Booster	17
3.1.1 Diseño conceptual.....	17
3.1.2 Circuito analógico	19
3.2 Pedal tipo Distorsión	23
3.2.1 Diseño conceptual.....	23
3.2.2 Circuito analógico	24
3.3 Circuito impreso y conexiones	27
4. PRUEBAS Y RESULTADOS.....	29
4.1 Simulaciones y mediciones para pedal Booster.....	30
4.2 Simulaciones y mediciones para pedal Distorsión.....	33
5. CONCLUSIONES.....	38
Referencias bibliográficas.....	39

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla #1 Parámetros Físicos de la Configuración Source Follower	14
Tabla #2 Valores de Ganancia para Efecto Booster	16
Tabla #3 Parámetros Físicos de la Primera Etapa del Circuito Booster	18
Tabla #4 Parámetros Físicos de la Tercera Etapa del Circuito Booster	20
Tabla #5 Parámetros Físicos de la Cuarta Etapa del Circuito Booster	21
Tabla #6 Valores de Ganancia del Circuito Booster	21
Tabla #7 Parámetros Físicos de la Primera Etapa del Circuito Distorsión.....	24
Tabla #8 Parámetros Físicos de la Segunda Etapa del Circuito Distorsión.....	25
Tabla #9 Valores Frecuencia de Corte Filtro HPF3 para Diferentes Ganancias.....	25
Tabla #10 Parámetros Señal Sinusoidal de Entrada.....	28
Tabla #11 Resultados Obtenidos para Ganancia del Pedal Booster.....	30

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura #1 Sistema y trayectoria de la señal de una guitarra eléctrica	13
Figura #2 Circuito Source Follower.....	14
Figura #3 Topología de Amplificador No Inversor basado en OpAmp.....	15
Figura #4 Diagrama de bloques para pedal Booster.....	17
Figura #5 Circuito de la primera etapa del pedal Booster.....	18
Figura #6 Circuito de la segunda etapa del pedal Booster.....	19
Figura #7 Circuito de la tercera etapa del pedal Booster.....	20
Figura #8 Circuito de la cuarta etapa del pedal Booster.....	21
Figura #9 Diagrama de bloques para pedal Distorsión.....	22
Figura #10 Circuito de la primera etapa del pedal Distorsión.....	23
Figura #11 Circuito de la segunda etapa del pedal Distorsión.....	24
Figura #12 Diagrama de conexiones.....	25
Figura #13 Implementación de circuito Booster en caja metálica.....	27
Figura #14 Implementación de circuito Distorsión en caja metálica.....	27
Figura #15 Señal de entrada para simulación y pruebas de circuito.....	28
Figura #16 Simulación del pedal Booster con ganancia al máximo.....	29
Figura #17 Medición del pedal Booster con ganancia al máximo.....	30
Figura #18 Respuesta en frecuencia del pedal Booster con Control de Tono en 4Hz.....	31
Figura #19 Respuesta en frecuencia del pedal Booster con Control de Tono en 340Hz.....	32

Figura #20 Simulación del pedal de Distorsión ganancia de la primera etapa al máximo.....	33
Figura #21 Medición del pedal de Distorsión ganancia de la primera etapa al máximo.....	33
Figura #22 Simulación del pedal de Distorsión ganancia de la segunda etapa al máximo	34
Figura #23 21 Medición del pedal de Distorsión ganancia de la segunda etapa al máximo...	34
Figura #24 Simulación del pedal de Distorsión ganancia ambas etapas al máximo	35
Figura #25 Medición del pedal de Distorsión ganancia ambas etapas al máximo.....	35

1. INTRODUCCIÓN

En el mundo artístico-musical, el diseño de circuitos electrónicos es muy importante para la manipulación de señales de audio. Dentro de la Ingeniería Electrónica existen un sinnúmero de técnicas de circuitos analógicos que permiten modificar las características físicas de estos fenómenos auditivos (Self, 2010). El principal objetivo es lograr que el oyente escuche las ondas sonoras de la mejor manera posible, ya sea en volumen, tono o timbre.

Considerando el caso de instrumentos musicales modernos como la icónica guitarra eléctrica, la mayoría de artistas utilizan circuitos destinados al procesamiento y amplificación de señales para la integración de efectos sonoros en sus interpretaciones (Dailey, 2013). Dichos efectos pueden ser categorizados según su función o principio de funcionamiento. En específico, los circuitos de efectos basados en la amplitud de la señal permiten a varios guitarristas conseguir un sonido distorsionado, característico de géneros musicales como el Rock and Roll o Rock Moderno (Herbst, 2019). Por esta razón, estos dispositivos comúnmente conocidos como pedales de efectos, dado a su empaque y accionamiento con el pie, son herramientas de expresión musical muy importantes en el mundo de la guitarra eléctrica (Clearly, 2021).

En este artículo, se muestra el diseño, pruebas y resultados de dos efectos de amplitud de señal para la guitarra eléctrica basados en técnicas de circuitos analógicos. El primero de ellos es un efecto de ganancia tipo Booster, el cual tiene como función principal amplificar la señal de entrada. El segundo efecto se trata de una distorsión de señal, el cual realiza una amplificación y recorte de las ondas provenientes de la guitarra eléctrica para conseguir diferentes tonalidades de distorsión de señal.

El diseño de estos dispositivos inicia con el desarrollo de bloques conceptuales para definir las etapas de los circuitos y parámetros de diseño adecuados en cada escenario.

Después, se muestra el diseño de los circuitos electrónicos considerando topologías basadas en componentes analógicos como amplificadores operacionales y transistores. Por último, se presenta el diseño de placas PCB para el montaje de los circuitos y la conexión con el sistema de la guitarra eléctrica.

En la sección de Pruebas y Resultados se presentan las simulaciones realizadas para ambos efectos propuestos mediante software computacional dedicado al diseño de circuitos electrónicos. Las señales de salida simuladas son analizadas para determinar el cumplimiento de los parámetros de diseño. Por último, se reportan las mediciones realizadas de los circuitos ya montados en placas PCB y cajas metálicas para comprobar su correcto funcionamiento. Este documento finaliza con una discusión y comparación de las ondas de salida resultantes en las simulaciones y mediciones de los dispositivos construidos.

2. CONCEPTOS BÁSICOS Y TOPOLOGÍAS DE DISEÑO

En primer lugar, es importante revisar conceptos y características de las señales generadas por la guitarra eléctrica. Existen diferentes tipos y estilos de guitarras eléctricas, por lo cual este estudio se basa en uno de los modelos más utilizados que es la Fender Stratocaster con micrófonos simples o Single Coils (Jeong & Cho, 2020).

Dentro del espectro audible del ser humano (20Hz – 20 KHz), la guitarra eléctrica se encuentra en una posición central (70Hz – 15KHz). Las señales de salida de estos instrumentos son generadas debido a la vibración de las cuerdas metálicas. Estas se componen de una frecuencia base y armónicos. Mediante el uso de bobinas y materiales magnéticos, los micrófonos de la guitarra eléctrica transforman las vibraciones de las cuerdas en señales eléctricas. Estas señales AC viajan por un medio físico como los cables de instrumento para ser posteriormente amplificadas y convertidas nuevamente en vibraciones mediante el uso de parlantes o bocinas (French, 2009). En la Fig. 1 se presenta un diagrama de bloques de alto nivel de los elementos físicos que permiten el funcionamiento de la guitarra eléctrica y el flujo de la señal dentro de este sistema. Se destaca que en el primer recuadro negro a la izquierda se encuentra la guitarra eléctrica como primera etapa. Es en dicho instrumento donde ocurre la conversión de la vibración de las cuerdas (energía mecánica) a señales eléctricas mediante el uso de los micrófonos o pastillas. Después estas ondas de voltaje viajan a una etapa de tratamiento de la señal. En este punto, representado por el recuadro rojo, es donde se introducen los pedales de efecto para modificar las características de las señales. Por último, en el bloque de amplificación, la señal va a ser nuevamente transformada a energía mecánica y salir del sistema mediante los parlantes o bocinas.

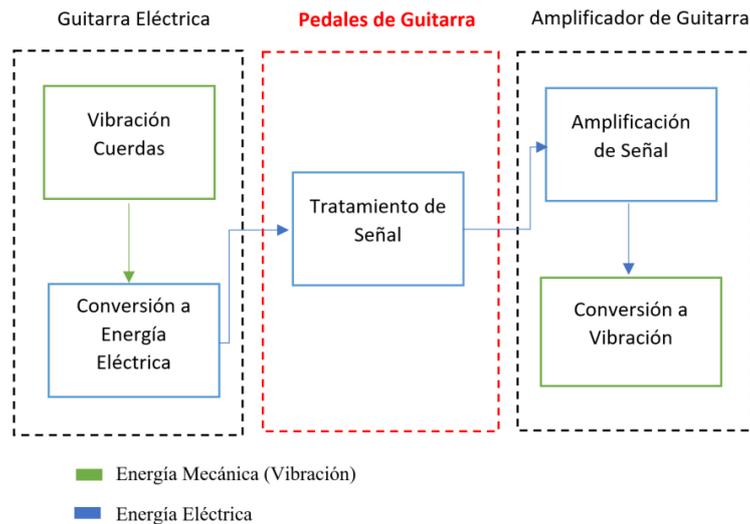


Figura 1: *Sistema y trayectoria de la señal de una guitarra eléctrica*

Por otro lado, se analiza las características de las topologías básicas de circuitos analógicos que van a ser utilizados en la sección de diseño de este artículo. Todas estas configuraciones están basadas en el uso de transistores y amplificadores operacionales para la construcción de circuitos amplificadores de señal. De acuerdo con Vyas, Yadav y Kumar (2013), el análisis de pequeña señal facilita la comprensión y modelado de este tipo de configuraciones.

2.1 Source Follower

La primera configuración se denomina Source Follower o Common Drain y es un circuito basado en el uso de un transistor. Este tipo de circuito es comunmente utilizado como buffer de entrada dado a su alta impedancia de entrada y ganancia unitaria (Sedra & Smith, 2004). En la Fig. 2 se muestra la construcción de este circuito y los elementos necesarios para su funcionamiento. Se destaca que el terminal de Drain del transistor se encuentra conectado directamente a tierra. La señal de entrada al circuito se conecta al terminal de Gate y el

voltaje de salida es tomado del terminal Source del MOSFET. La Tabla 1 presenta los parámetros físicos que caracterizan a esta topología.

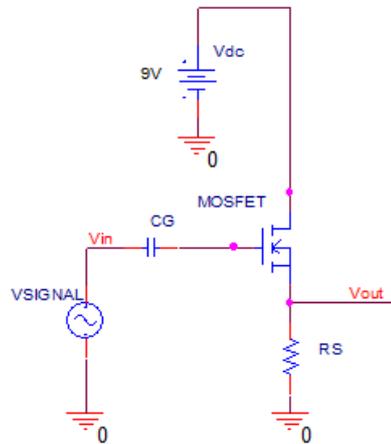


Figura 2: Circuito Source Follower

Tabla 1: Parámetros físicos de la configuración Source Follower

Parámetro	Símbolo	Valor
Ganancia de Voltaje	A_v	1
Impedancia de Entrada	Z_{in}	∞
Impedancia de Salida	Z_{out}	$1/g_m$

Donde: g_m es la transconductancia del transistor

2.2 Amplificador No Inversor

Como lo plantea Self (2010), la amplificación de señales de audio mediante el uso de circuitos integrados de tipo Amplificadores Operacionales brinda muchos beneficios. El funcionamiento de la configuración No Inversora de estos elementos se basa en la amplificación de una señal AC de entrada obteniendo una señal de mayor amplitud con la misma polaridad a la salida. En este tipo de topología, la ganancia del sistema se define con la Ecuación 1:

$$A_v = \left(\frac{R_2}{R_1} \right) + 1 \quad (1)$$

Donde R_1 es la resistencia del lazo de realimentacion y R_2 la resistencia conectada a tierra, como se muestra en la Fig. 3.

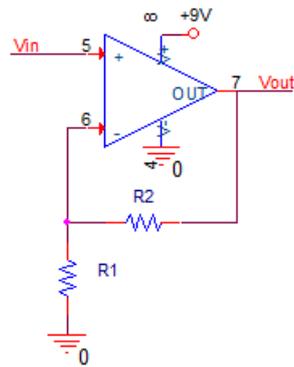


Figura 3: *Topología de Amplificador No Inversor basado en OpAmp*

3. DISEÑO

En esta sección se muestra el proceso de diseño y análisis de los circuitos analógicos para los dos efectos de guitarra eléctrica basados en amplitud de la señal.

3.1 Pedal tipo Booster

La principal función de este efecto es la amplificación sin distorsión de una señal de entrada. Para esto la señal de salida debe contar con una forma de onda similar a la señal de entrada del circuito.

Para iniciar con el diseño, se define que la ganancia del efecto sea de aproximadamente 20dB. De acuerdo con Al-Salim et al. (2010), las diferentes categorías de percepción de ruido en la audición humana se distinguen en intervalos de 10dB. En la Tabla 2 se presentan los valores de voltaje correspondientes a este parámetro de diseño. Se consideran los voltajes pico a pico promedio de la señal producida por una guitarra tipo Stratocaster (400mV). Se destaca que el valor de voltaje pico a pico de la señal de salida al aplicar una ganancia de 20dB debe ser de 4V.

Tabla 2 Valores de ganancia para efecto Booster

Parámetro	Valor
Ganancia de Voltaje	20dB
V_{pp} señal entrada	400mV
V_{pp} señal salida	4V

3.1.1 Diseño conceptual

Con los parámetros de diseño definidos en la sección anterior, se plantea en la Figura 4 un diagrama de bloques del circuito del pedal de tipo Booster. Se cuenta con cuatro etapas

diferentes para manipular la señal de la mejor manera posible. El primer bloque de diseño es un buffer de señal destinado al acoplamiento de impedancias entre el efecto y la guitarra eléctrica. Como lo plantea Ban (2006), dado a los estándares de la industria la impedancia de salida de los micrófonos de las guitarras eléctricas es elevada, alrededor de 1 Mega Ohm. Por esta razón se utiliza un circuito tipo buffer que permite modificar la impedancia de entrada de un circuito y aislar las etapas posteriores del efecto.

En la segunda etapa se agrega un control de tono mediante una configuración de filtros pasa-altos con frecuencia de corte variable. El propósito de este bloque es permitir que el instrumentista defina la cantidad de frecuencias bajas que van a ser amplificadas en las siguientes etapas del circuito. Mynett (2009) plantea que el control de las frecuencias bajas es uno de los retos más grandes a la hora de trabajar en la producción y mezcla de instrumentos de cuerda. En la Ecuación 2 se define el rango de las frecuencia de corte variable del filtro.

$$f_{cHPF} = [5Hz, 350Hz] \quad (2)$$

Por último, se encuentran los bloques de pre amplificación y amplificación de señal. La preamplificación se utiliza para recuperar la amplitud de la señal que fue perdida durante las etapas de buffer y filtrado. Mientras que la etapa de amplificación se encarga de la función principal de este efecto.

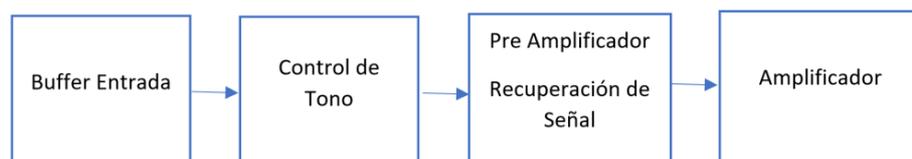


Figura 4: Diagrama de bloques para pedal Booster

3.1.2 Circuito analógico

A continuación, se reporta el diseño del circuito analógico para el pedal denominado Booster. Se presenta el análisis de redes y parámetros de interés para cada bloque de diseño.

Para comenzar, se utiliza la topología Source Follower de la Figura 2 como Buffer de señal. La impedancia de entrada de este circuito tiende al infinito, pero en la práctica es necesario introducir una resistencia de polarización para definir el punto de operación del transistor. Así mismo, es oportuno contar con una resistencia de protección para el terminal de Gate en caso de fenómenos como descargas electrostáticas. En la Fig. 5 se presenta el circuito resultante para el primer bloque de diseño de este efecto. Los elementos conectados en serie a la fuente de entrada (R1 y C1) son utilizados para acoplar de manera adecuada el circuito. En la tabla 3 se muestra los valores obtenidos para los parámetros de interés de esta etapa. Se consigue un valor aproximado de 1 Mega Ohm para la impedancia de entrada, cumpliendo con las consideraciones presentada en el diseño conceptual.

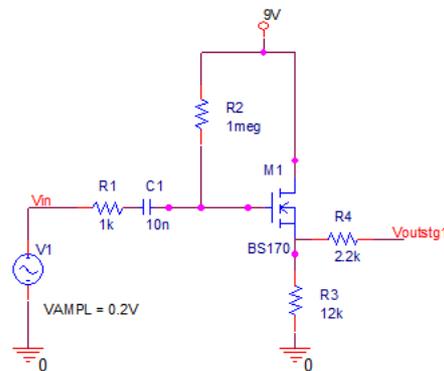


Figura 5: Circuito de la primera etapa del pedal Booster: Buffer de Señal

Tabla 3: Parámetros físicos de la primera etapa del circuito Booster

Parámetro	Valor
A_v	1
Z_{in}	$\sim 1M\Omega$
Z_{out}	$\sim 2.2K\Omega$

La segunda etapa de este efecto consiste en un arreglo de filtros pasa-altos para obtener un recorte de frecuencias bajas de la señal de la guitarra eléctrica. La configuración presentada en la Figura 6 es un mezclador de señal que combina dos filtros pasa-altos (HPF1 y HPF2) con distintas frecuencias de corte. Al juntar mediante un potenciómetro las señales que provienen de los filtros, el usuario puede seleccionar una frecuencia de corte deseada.

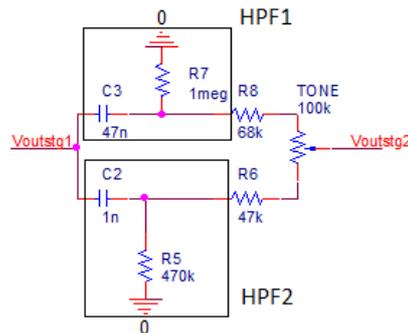


Figura 6: Circuito de la segunda etapa del pedal Booster: Control de Tono

Según los valores comerciales de los elementos electrónicos utilizados para este pedal de efecto, el rango resultante de la frecuencia de corte variable en esta etapa se muestra en la Ecuación 3. Se destaca que el intervalo de frecuencias es similar al considerado en el diseño conceptual.

$$f_{cHPF} = [4Hz, 340Hz] \quad (3)$$

El tercer bloque de diseño utilizado como preamplificador de señal es basado en una configuración No Inversora como la que se muestra en la Figura 3. Para lograr amplificar de manera adecuada la señal AC que proviene de las etapas anteriores, se añade un nivel de voltaje DC en la señal de entrada del amplificador para crear un offset positivo. En la Figura 7 se muestra el circuito analógico diseñado para esta etapa. Así mismo, se destaca la presencia de un filtro pasaaltos HPF3 (formado por C5 y R11) conectado al terminal inversor

del OpAmp. La frecuencia de corte de este filtro se encuentra fuera del rango audible (7Hz) y su uso es destinado a la eliminación de ruido DC. Los parámetros de interés de esta configuración se encuentran en la Tabla 4.

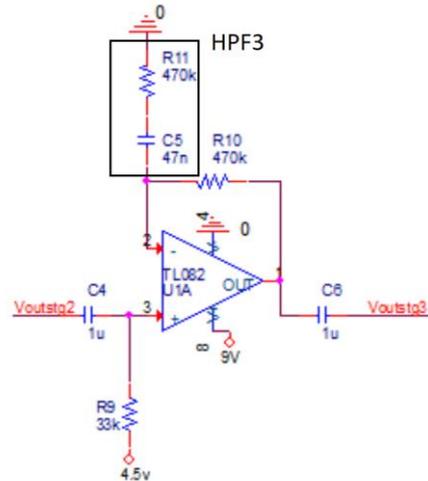


Figura 7: Circuito de la tercera etapa del pedal Booster: Pre-Amplificador

Tabla 4: Parámetros físicos de la tercera etapa del circuito Booster

Parámetro	Valor
A_v	2
f_{cHPF3}	7Hz

La última etapa del circuito Booster es similar a la topología del tercer bloque de diseño. Se aumenta la ganancia del amplificador y se integra un control de volumen, el cual consiste en una resistencia variable con uno de sus terminales conectados directamente a tierra. En la Fig. 8 y la Tabla 5 se muestra la información relacionada a esta cuarta etapa del circuito.

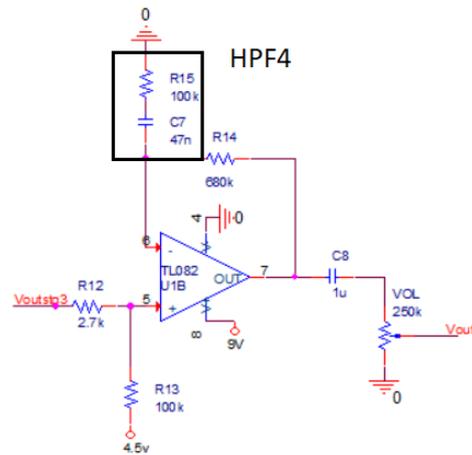


Figura 8: Circuito de la cuarta etapa del pedal Booster: Amplificador

Tabla 5: Parámetros físicos de la cuarta etapa del circuito Booster

Parámetro	Valor
A_v	6.8
f_{cHPF4}	33Hz

Para obtener la ganancia global del sistema, se realiza la multiplicación de las ganancias individuales de cada etapa (Dorf & Svoboda, 2010). Esto se expresa en la Ec. 4.

$$A_{vBooster} = A_{vEtapa1} * A_{vEtapa2} * A_{vEtapa3} * A_{vEtapa4} \quad (4)$$

Las magnitudes de la ganancia global para este efecto se presentan en la Tabla 6.

Tabla 6: Valores de ganancia del circuito Booster

Parámetro	Valor
$A_{vBooster}$	13.6
$A_{vBooster}$ en dB	22.7dB

3.2 Pedal tipo Distorsión

El efecto de tipo distorsión se encarga de amplificar y recortar las ondas de entrada generadas por la guitarra eléctrica. Por este motivo, la señal de salida del circuito tiene una nueva forma de onda presentando pérdidas de información en los picos o niveles más altos de la señal.

Para iniciar con el diseño del segundo circuito, se define que este pedal va a contar con 2 etapas diferentes de recorte de señal. Como lo plantean Arif, Boga, Leone y Ramirez (s.f), la utilización de diferentes etapas de ganancia y técnicas de recorte permite crear distintos tipos de efectos de distorsión como lo son el Overdrive (Recorte Suave) y Distorsión (Recorte Agresivo).

3.2.1 Diseño conceptual

En la Fig. 9 se presenta el diagrama de bloques del circuito de distorsión de señal. Para este pedal se reduce la cantidad de bloques de diseño, no obstante, estas etapas cuentan con varias funcionalidades.



Figura 9: Diagrama de bloques para pedal de Distorsión

El primer bloque es dedicado al acoplamiento de impedancias de entrada y a la amplificación con un recorte sutil de la señal. Para esto, se utiliza una combinación de diodos conectados de forma antiparalela dentro del lazo de realimentación del Amplificador No Inversor presentado en la Fig. 10.

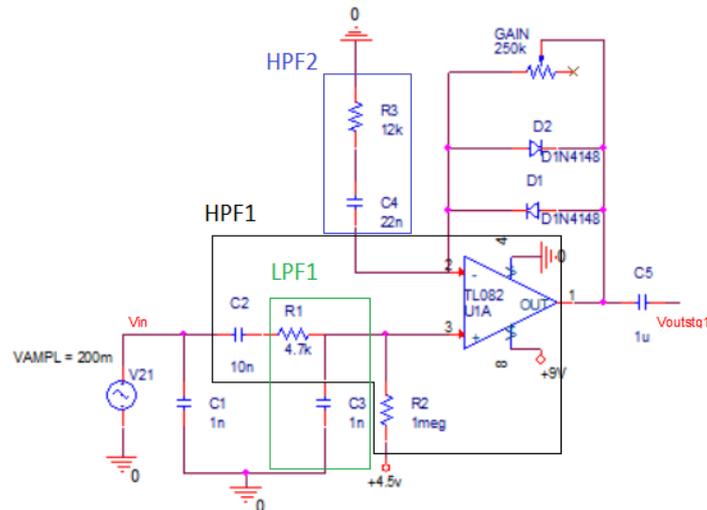


Figura 10: Circuito de la primera etapa del pedal Distorsión

A continuación, se encuentra una etapa de ganancia más agresiva. Para conseguir un recorte de señal más pronunciado, se utilizan diodos con un voltaje de activación menor y que se encuentren conectados de forma antiparalela directamente a tierra. En este punto del circuito, se plantea utilizar una manipulación dinámica de la respuesta en frecuencia. Esto quiere decir, que la curva de respuesta en frecuencia cambia su forma según la cantidad de ganancia aplicada en esta etapa.

3.2.2 Circuito analógico

El primero bloque de diseño mostrado en la Figura 10, se construye mediante un amplificador basado en la configuración No Inversora de la Figura 3. Se añade una una red RC a la entrada del OpAmp, que permite el acoplamiento de impedancias Z_{in} filtrado de señal HPF1 y LPF1, protección del terminal no inversor del OpAmp R1 y la introducción de un offset positivo en la señal de entrada R2.

En el lazo de realimentación de la configuración No Inversora, se utiliza un potenciómetro (GAIN) destinado al control de la ganancia de esta etapa. Así mismo, dos

diodos se encuentran conectados en antiparalelo dentro de este lazo para realizar un recorte sutil de la señal.

Los parámetros de interés que caracterizan esta topología se muestran en la Tabla 7. Se destaca que la impedancia de entrada del circuito es elevada, alrededor de 1Mega Ohm. La ganancia sobrepasa los 30dB para poder realizar el recorte de señal mediante los diodos conectados en antiparalelo. Las frecuencias de corte para los filtros formados en esta configuración cumplen con los requisitos del diseño conceptual.

Tabla 7: Parámetros físicos de la primera etapa del circuito Distorsión

Parámetro	Valor
Z_{in}	950K Ω
Z_{out}	12K Ω
$A_{vstage1}$	42.67
f_{cHPF1}	12.43Hz
f_{cHPF2}	603Hz
f_{cLPF1}	33KHz

En la Figura 11, se presenta la segunda etapa del circuito analógico del pedal de distorsión. La configuración de amplificador No Inversor de esta topología cuenta con el control de ganancia fuera del lazo de realimentación. Esto permite que el filtro pasaaltos HPF3 formado por C6 y R7 cambie su frecuencia de corte según el nivel de ganancia aplicada. Así mismo, se destaca que a la salida del OpAmp se encuentra una configuración de diodos antiparalelos conectados directamente a tierra. Esta técnica de recorte permite distorsionar la señal de mayor manera. Por último, se encuentra un potenciómetro o resistencia variable conectada a tierra para controlar la amplitud de la señal a la salida del circuito.

En la Tabla 8 se presentan los parámetros de interés de esta topología. En la Tabla 9, se demuestra el cambio de la frecuencia de corte del filtro pasaaltos HPF3 al considerar

diferentes valores de ganancia de esta segunda etapa determinados por el potenciómetro DIST. Se destaca que la frecuencia de corte disminuye al aumentar los niveles de ganancia del amplificador.

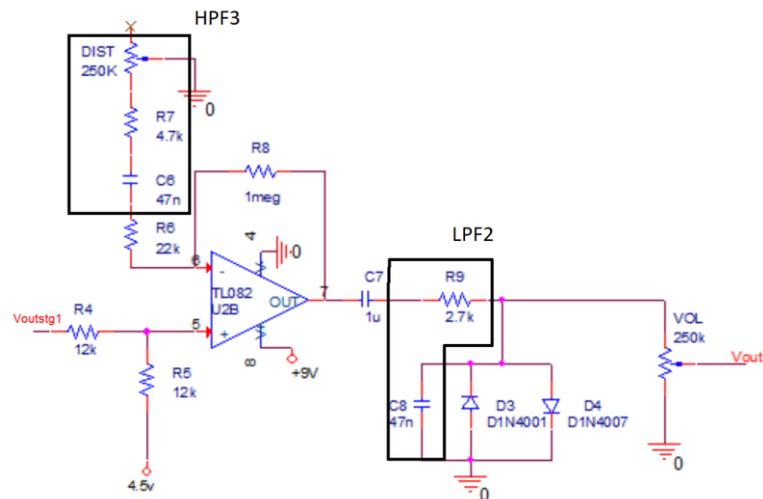


Figura 11: Circuito de la segunda etapa del pedal Distorsión

Tabla 8: Parámetros físicos de la segunda etapa del circuito Distorsión

Parámetro	Valor
$A_{vstage2}$	38.45
f_{cHPF3}	13 - 720Hz
f_{cLPF2}	13KHz

Tabla 9: Valores frecuencia de corte filtro HPF3 para diferentes ganancias

DIST	f_{cHPF3}
0 Ω	720Hz
125K Ω	26Hz
250K Ω	13Hz

3.3 Circuito impreso y conexiones

Para el montaje de los circuitos, se diseñaron placas PCB que permiten optimizar el uso de espacio dentro de las cajas metálicas de los pedales de efecto. Las dimensiones son muy importantes para el anclaje apropiado de los circuitos y su conexión con el sistema de la guitarra eléctrica. Se utilizan elementos externos como conectores de audio de 1/4 de pulgada para introducir las señales de la guitarra eléctrica en el circuito. Así mismo, la polarización DC de 9V proviene de un adaptador comercial. El accionamiento del pedal se lo realiza mediante un switch principal de tipo 3PDT que permite aislar completamente el circuito diseñado y contar con una desviación o Bypass de la señal de la guitarra en caso de que el pedal no se encuentre activado. En la Figura 12, se muestra el diagrama de conexiones necesarias para el montaje de los circuitos diseñados. En las Figuras 13 y 14 se presentan imágenes del resultado obtenido al montar los circuitos utilizando la metodología descrita.

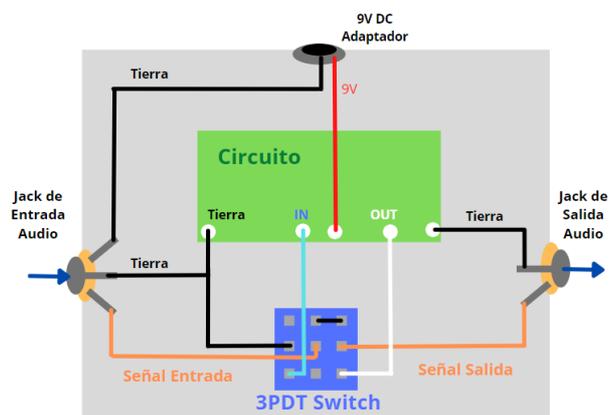


Figura 12: Diagrama de conexiones



Figura 13: *Implementación de circuito Booster en caja metálica*



Figura 14: *Implementación de circuito Distorsión en caja metálica*

4. PRUEBAS Y RESULTADOS

En esta sección se presentan los resultados obtenidos mediante simulaciones de los circuitos diseñados y las mediciones físicas de los pedales ya construidos. Se realiza un análisis comparativo de los voltajes y formas de onda para garantizar el cumplimiento de los parámetros de diseño presentados en la sección anterior.

Todas las simulaciones presentadas en esta sección son realizadas utilizando el software especializado ORCAD Capture PSPICE. Se analiza el comportamiento en estado estable de los circuitos considerando una onda sinusoidal de entrada la cual se muestra en la Fig. 15. Las características de esta señal de entrada se muestran en la Tabla 10. De la misma forma, se estudia la respuesta en frecuencia de los pedales considerando los filtros de señal y diferentes configuraciones de cada efecto.

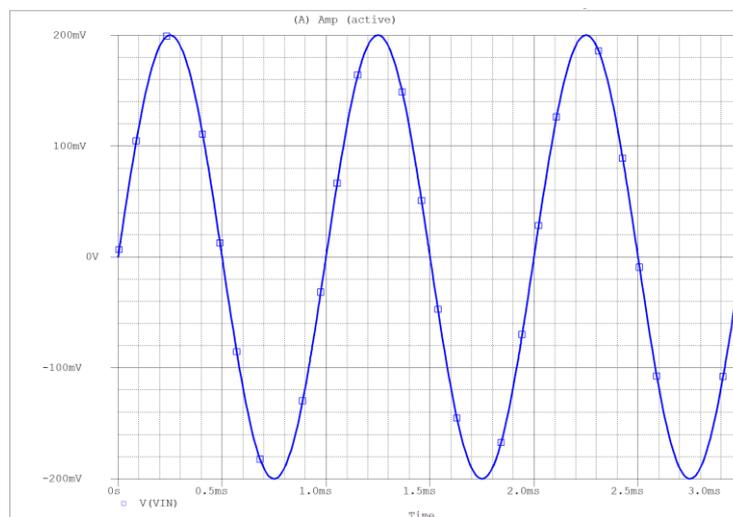


Figura 15: Señal de entrada para simulación y pruebas de circuitos

Tabla 10: Parámetros de señal sinusoidal de entrada

Parámetro	Valor
V_{pp}	400mV
f	1KHz

4.1 Simulaciones y mediciones para pedal Booster

Según las consideraciones del diseño, el pedal de tipo Booster debe presentar una ganancia máxima de 20dB sin contar con ningún tipo de distorsión o recorte de señal. Para comprobar que se cumple con la ganancia esperada, se analiza el caso del pedal funcionando en su nivel de amplificación más alto con el control de tono configurado en su frecuencia de corte más baja.

En la Fig. 16, se presenta la simulación de este circuito con las consideraciones planteadas. En rojo se muestra la señal de salida y en color azul se presenta la señal de entrada de la Fig.15 como referencia. Por otro lado, en la Fig. 17, se presenta la medición real del voltaje de salida al probar el pedal de efecto construido físicamente. En color naranja se muestra la onda de salida y en color azul se visualiza la onda de entrada sinusoidal. En la Tabla 11, se presentan los valores de ganancia obtenidos para cada caso y se calcula un error porcentual del este parámetro en comparación al valor teórico de la ganancia esperada (20dB).

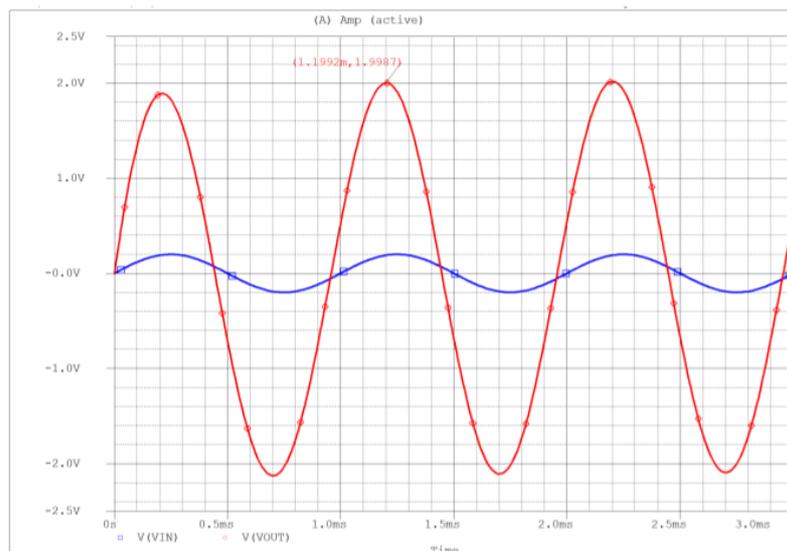


Figura 16: Simulación para pedal Booster con ganancias al máximo

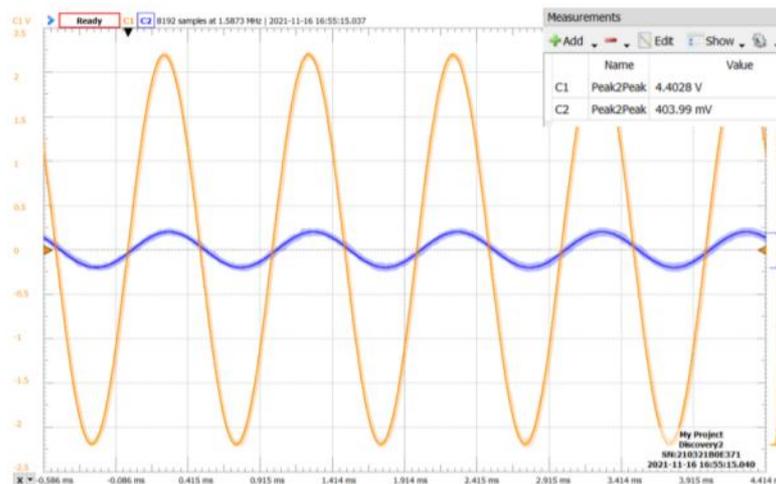


Figura 17: Medición del pedal Booster con ganancia al máximo

Tabla 11: Resultados obtenidos para ganancia del pedal Booster

Tipo	Valor de Ganancia	Error Porcentual
Teórico	20dB	0%
Simulación	19.99dB	0.05%
Medición Real	20.82dB	0% (Ganancia Superior)

Se destaca que en ambos resultados de simulación y mediciones reales del circuito, el pedal Booster cumple con la ganancia requerida. El error porcentual es muy bajo y es importante resaltar que las formas de onda obtenidas en este análisis no presentan ningún tipo de distorsión o ruido no deseado.

Considerando la respuesta en frecuencia de este pedal, se busca evidenciar el efecto de la etapa de Control de Tono diseñada. Para esto se plantean dos simulaciones, donde la frecuencia de corte del arreglo de filtros pasaltos tome su valor mínimo y máximo presentados en el intervalo de la Ecuación 3. Se presentan dos diagramas de Bode en las Figuras 18 y 19. La primera gráfica muestra la respuesta en frecuencia del efecto cuando el

control de tono o frecuencia de corte del filtro está en el valor mínimo del intervalo (4Hz). En este escenario, la respuesta en frecuencia es lineal para todo el espectro de señales generadas por la guitarra eléctrica. Por otro lado, en el segundo caso se selecciona la frecuencia de corte más alta (340Hz). En esta segunda simulación, se presenta un recorte de frecuencias bajas a partir de los 380Hz. La respuesta en frecuencia de ambos casos cumple con los parámetros de diseño presentados en la sección anterior y se afirma que la etapa de Control de Tono de este pedal cumple con el recorte de frecuencias bajas consideradas en el diseño.

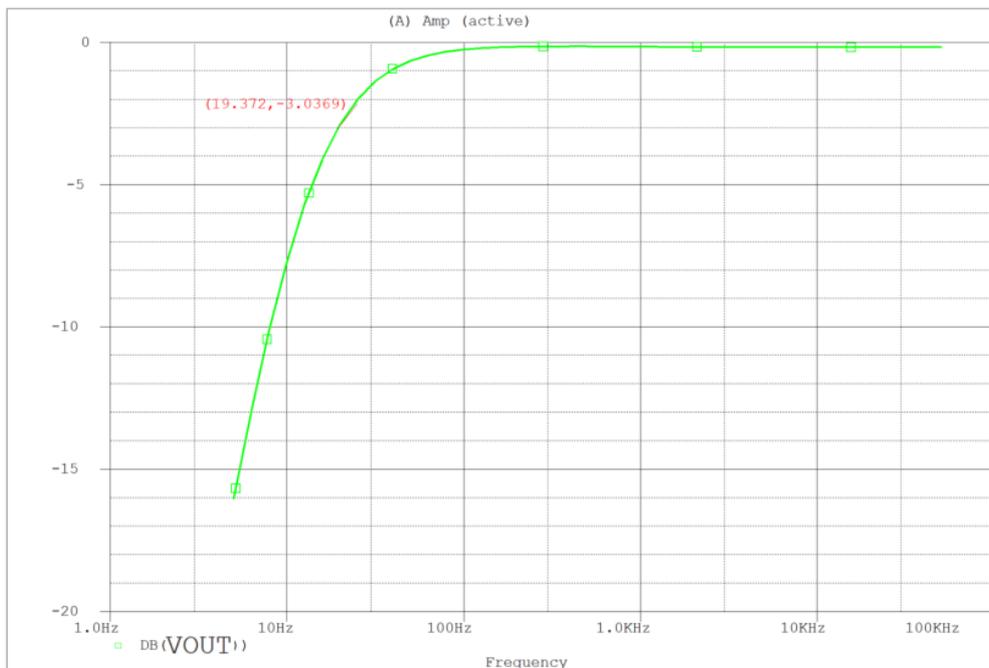


Figura 18: Respuesta en frecuencia del pedal Booster con Control de Tono en 4Hz

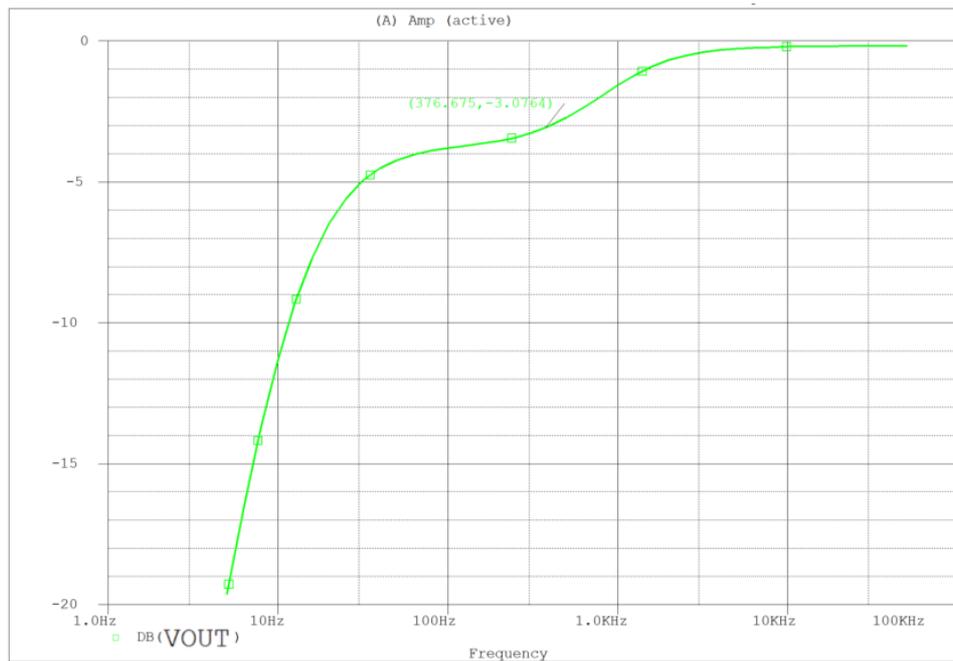


Figura 19: Respuesta en frecuencia del pedal Booster con Control de Tono en 340Hz

4.2 Simulaciones y mediciones para pedal Distorsión

Para el efecto de distorsión, se simula y prueba el circuito de forma que las dos etapas de amplificación de señal de este pedal de efecto sean consideradas dentro del análisis. Se definen tres casos principales para la configuración de ganancias del circuito. En el primer escenario, se fija la primera etapa de amplificación con la ganancia al máximo. Después, se utiliza solamente la segunda etapa de amplificación del circuito con su nivel de ganancia al máximo. Por último en el tercer caso de prueba, se combinan ambas etapas de amplificación del circuito con la ganancia configurada al máximo.

En las Figuras 20 y 21 , se presentan los resultados simulados y medidos en el circuito real para el primer caso de prueba . Se destaca que en ambas gráficas, la señal de salida es amplificada y cuenta con un recorte en los picos más altos de la señal. Sin embargo, en estas

señales de salida, se mantiene una ligera pendiente entre el nivel máximo recortado y la señal original.

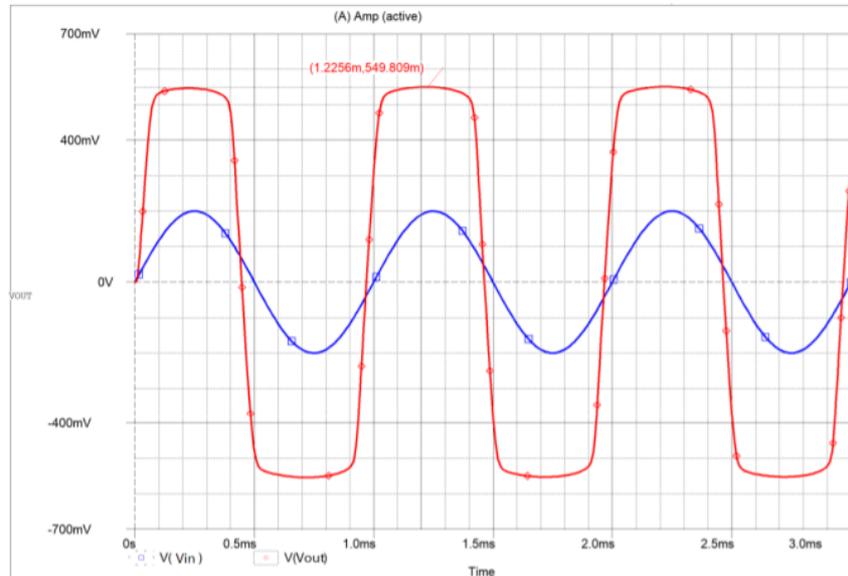


Figura 20: Simulación del pedal de Distorsión con ganancia de la primera etapa al máximo

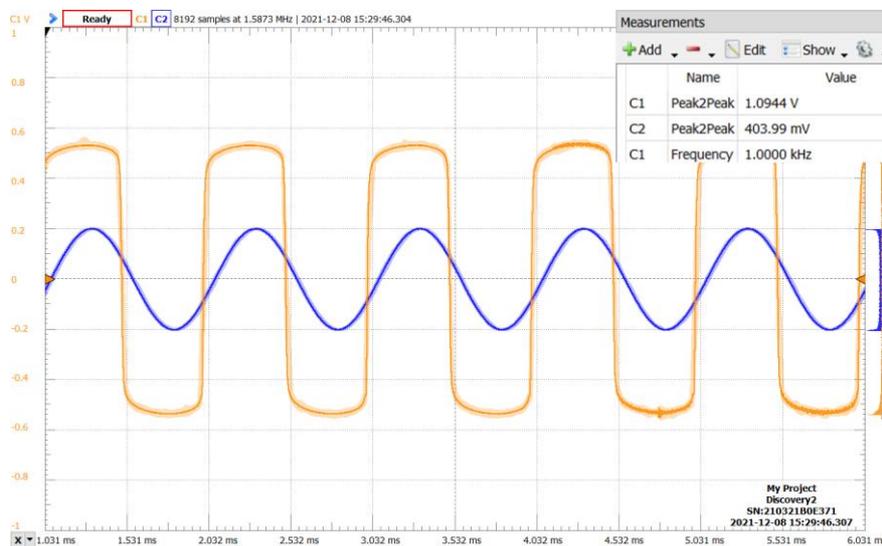


Figura 21: Medición del pedal de Distorsión con ganancia de la primera etapa al máximo

En el segundo caso de prueba, se define la ganancia de la primera etapa como unitaria y la segunda etapa se encuentra en su nivel de amplificación más alto. En las Figuras 22 y 23, se evidencia que la señal de salida es recortada de manera agresiva dado al tipo de configuración de recorte de los diodos en la segunda etapa de amplificación.

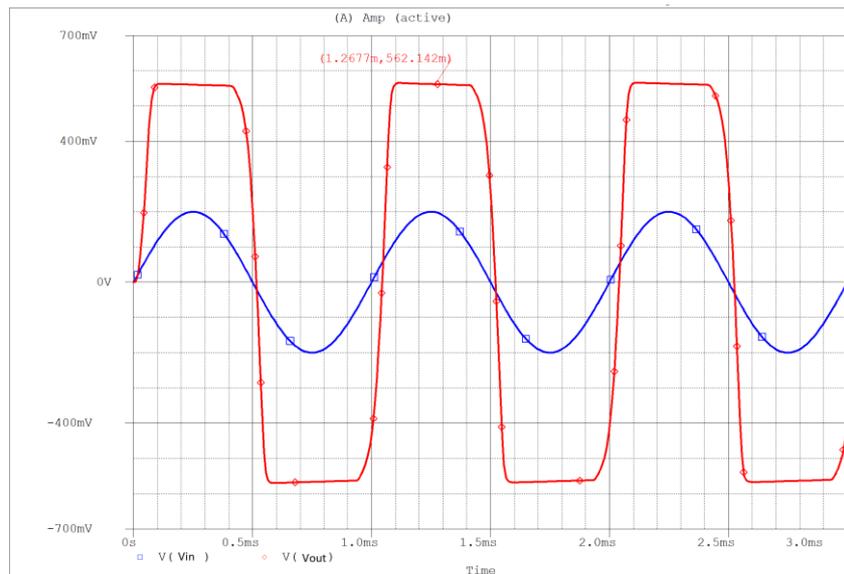


Figura 22: Simulación del pedal de Distorsión con ganancia de la segunda etapa al máximo

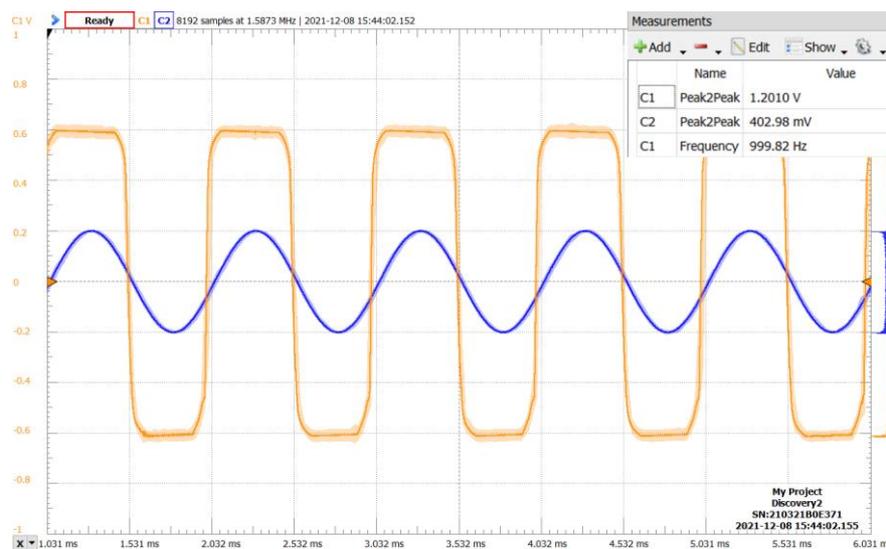


Figura 23: Medición del pedal de Distorsión con ganancia de la segunda etapa al máximo

Por último, el tercer caso de prueba se visualiza en la simulación presentada en la Figura 24 y las mediciones reales mostradas en la Fig. 25. Este escenario de prueba cuenta con ambas etapas del circuito configuradas con la ganancia al máximo. La señal de salida de ambas gráficas presenta el recorte y distorsión de señal más notorio de todos los casos de prueba.

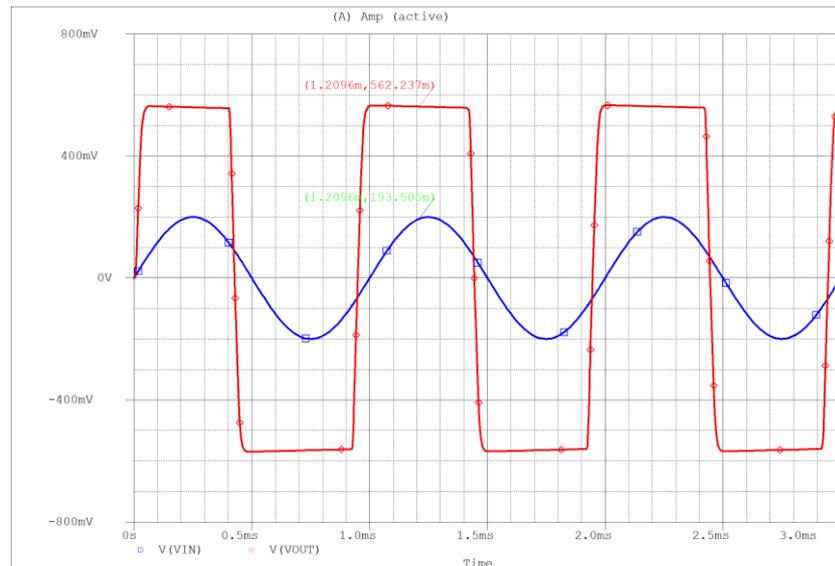


Figura 22: Simulación del pedal de Distorsión con ganancia de ambas etapas al máximo

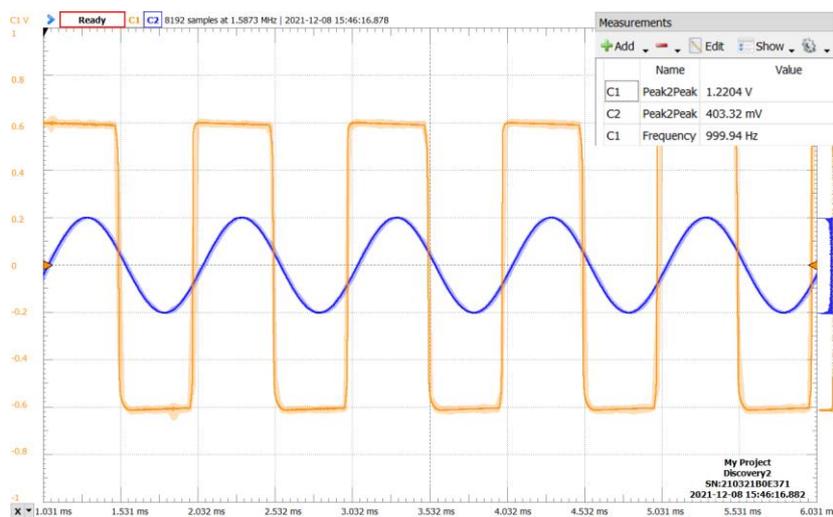


Figura 22: Medición del pedal de Distorsión con ganancia de ambas etapas al máximo

Se comprueba que a mayores niveles de ganancia, la señal de salida tiende a distorsionarse de mayor manera y la forma de onda se asemeja más a una onda cuadrada. Ambas etapas de amplificación de este circuito pueden trabajar de manera individual o se puede combinar su efecto para conseguir distintos tipos de distorsión según el recorte de señal deseado.

5. CONCLUSIONES

En este trabajo se logró diseñar e implementar dos distintos tipos de efectos para la guitarra eléctrica basados en la amplitud de señal. Se utilizaron bloques de diseño de electrónica analógica para manipular las señales eléctricas provenientes de este instrumento. Los parámetros y características de las topologías utilizadas permiten que ambos circuitos se integren sin complicaciones dentro del sistema de la guitarra eléctrica. Para garantizar los cálculos teóricos, se realizaron simulaciones de los circuitos planteados. Se comprueba mediante mediciones que los parámetros de diseño se cumplen en los circuitos físicos construidos y montados dentro de cajas metálicas.

Con relación al pedal de tipo Booster, se logra conseguir una ganancia de 20dB, donde la señal de entrada es amplificada sin recorte o pérdidas de información. Se aplica una etapa de control de tono que realiza el recorte de frecuencias bajas según un valor de la frecuencia de corte variable seleccionada por el usuario. Por otro lado, para el pedal de distorsión se evidencia los distintos tipos de recorte de señal. Ambas etapas de amplificación de este circuito trabajan de acuerdo a lo esperado y pueden ser utilizadas individualmente o combinando su efecto para conseguir distintos tipos de tonalidades en la distorsión aplicada.

Se afirma que la manipulación de las señales eléctricas de audio brinda nuevas herramientas de expresión para los instrumentistas y músicos. Se logra dar características modernas al sonido de la guitarra eléctrica mediante la manipulación de la amplitud de señal y repuesta en frecuencia. Ambos pedales diseñados tienen diferentes controles y modos de operación que permiten un funcionamiento flexible y personalizable por el usuario.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Al-Salim, S., Kopun, J., Neely, S., Jesteadt, W., Stiegemann, B., & Gorga, M. (2010). Reliability of Categorical Loudness Scaling and Its Relation to Threshold. *Ear & Hearing*, 31(4), 567-578. doi: 10.1097/aud.0b013e3181da4d15
- Arif, A., Boga, B., Leone, K., & Ramirez, J. G12 PedalVision (MSc). University of Central Florida.
- Ban, F. (2006). Analysis of Electric Guitar Pickups. Huntington Beach, CA: Penn State University.
- Clearly, J. (2020). Fuzz Distortion Guitar Stompbox (BS in Electrical Engineering). California Polytechnic State University.
- Dailey, D. (2013). Electronics for Guitarists. New York, NY: Springer New York.
- Dorf, R., & Svoboda, J. (2010). Introduction to electric circuits. New York, N.Y.: John Wiley & Sons, Inc.
- French, R. (2009). Engineering the Guitar Theory and Practice. Springer.
- Herbst, J. (2019). Distortion and Rock Guitar Harmony. *Music Perception*, 36(4), 335-352. doi: 10.1525/mp.2019.36.4.335
- Jeong, S., & Cho, T. (2020). A study on the electric guitar -focusing on fender stratocaster-. *Journal Of The Korea Academia-Industrial Cooperation Society*, 21(5), 426-432.
- Mynett, M. (2009). Mixing metal: The SOS Guide To Extreme Metal Production: Part 2. *Sound On Sound*, 118-126. Recuperado de: <http://eprints.hud.ac.uk/id/eprint/9913/1/MynettMixing.pdf>
- Sedra, A., & Smith, K. (2004). Microelectronic circuits. New York: Oxford University Press.
- Self, D. (2010). Small signal audio design. Oxford, U.K.: Focal Press.
- Vyas, P., Yadav, T., & Kumar, S. (2013). Analysis and Design of MOSFET based Amplifier in Different Configurations. In 2nd National conference in Intelligent Computing & Communication. Noida: GCET.