



UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA

GESTIÓN DE BIBLIOTECAS

CARTA DE AUTORIZACIÓN



CÓDIGO	AP-BIB-FO-06	VERSIÓN	1	VIGENCIA	2014	PÁGINA	1 de 2
--------	--------------	---------	---	----------	------	--------	--------

Neiva, Marzo 7 de 2023

Señores

CENTRO DE INFORMACIÓN Y DOCUMENTACIÓN

UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA

Ciudad

El (Los) suscrito(s):

David Fernando Rafael Augusto Cuellar Ramos, con C.C. No. 1075246603,

Luis Eduardo Gutiérrez Antolínez, con C.C. No. 1075213021,

_____, con C.C. No. _____,

_____, con C.C. No. _____,

Autor(es) de la tesis y/o trabajo de grado o _____

Titulado: Desarrollo e implementación de pedalera eléctrica para violonchello

presentado y aprobado en el año 2022 como requisito para optar al título de

Ingeniero electrónico ;

Autorizo (amos) al CENTRO DE INFORMACIÓN Y DOCUMENTACIÓN de la Universidad Surcolombiana para que, con fines académicos, muestre al país y el exterior la producción intelectual de la Universidad Surcolombiana, a través de la visibilidad de su contenido de la siguiente manera:

- Los usuarios puedan consultar el contenido de este trabajo de grado en los sitios web que administra la Universidad, en bases de datos, repositorio digital, catálogos y en otros sitios web, redes y sistemas de información nacionales e internacionales “open Access” y en las redes de información con las cuales tenga convenio la Institución.
- Permite la consulta, la reproducción y préstamo a los usuarios interesados en el contenido de este trabajo, para todos los usos que tengan finalidad académica, ya sea en formato Cd-Rom o digital desde internet, intranet, etc., y en general para cualquier formato conocido o por conocer, dentro de los términos establecidos en la Ley 23 de 1982, Ley 44 de 1993, Decisión Andina 351 de 1993, Decreto 460 de 1995 y demás normas generales sobre la materia.
- Continúo conservando los correspondientes derechos sin modificación o restricción alguna; puesto que, de acuerdo con la legislación colombiana aplicable, el presente es un acuerdo jurídico que en ningún caso conlleva la enajenación del derecho de autor y sus conexos.

Vigilada Mineducación

La versión vigente y controlada de este documento, solo podrá ser consultada a través del sitio web Institucional www.usco.edu.co, link Sistema Gestión de Calidad. La copia o impresión diferente a la publicada, será considerada como documento no controlado y su uso indebido no es de responsabilidad de la Universidad Surcolombiana.



UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA
GESTIÓN DE BIBLIOTECAS

CARTA DE AUTORIZACIÓN



CÓDIGO	AP-BIB-FO-06	VERSIÓN	1	VIGENCIA	2014	PÁGINA	2 de 2
--------	--------------	---------	---	----------	------	--------	--------

De conformidad con lo establecido en el artículo 30 de la Ley 23 de 1982 y el artículo 11 de la Decisión Andina 351 de 1993, "Los derechos morales sobre el trabajo son propiedad de los autores", los cuales son irrenunciables, imprescriptibles, inembargables e inalienables.

EL AUTOR/ESTUDIANTE:

David Fernando R.A. Cuellar Ramos

Firma:

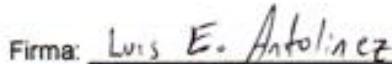


CC: 1015.046.602

EL AUTOR/ESTUDIANTE:

Luis Eduardo Gutiérrez Antolínez

Firma:



CC: 1075213021

Vigilada Mineducación

La versión vigente y controlada de este documento, solo podrá ser consultada a través del sitio web Institucional www.usco.edu.co, link Sistema Gestión de Calidad. La copia o impresión diferente a la publicada, será considerada como documento no controlado y su uso indebido no es de responsabilidad de la Universidad Surcolombiana.

TÍTULO COMPLETO DEL TRABAJO: Desarrollo e implementación de pedalera eléctrica para violonchelo

AUTOR O AUTORES:

Primero y Segundo Apellido	Primero y Segundo Nombre
Cuellar Ramos	David Fernando Rafael Augusto
Gutiérrez Antolínez	Luis Eduardo

DIRECTOR Y CODIRECTOR TESIS:

Primero y Segundo Apellido	Primero y Segundo Nombre
Bravo Obando	Martin Diomedes

ASESOR (ES):

Primero y Segundo Apellido	Primero y Segundo Nombre
No Aplica	No Aplica

PARA OPTAR AL TÍTULO DE: Ingeniero Electrónico

FACULTAD: Ingeniería

PROGRAMA O POSGRADO: Electrónica

CIUDAD: Neiva

AÑO DE PRESENTACIÓN: 2022 **NÚMERO DE PÁGINAS:** 79

TIPO DE ILUSTRACIONES (Marcar con una X):

Diagramas Fotografías Grabaciones en discos Ilustraciones en general Grabados
Láminas Litografías Mapas Música impresa Planos Retratos Sin ilustraciones Tablas o Cuadros

Vigilada Mineducación

La versión vigente y controlada de este documento, solo podrá ser consultada a través del sitio web Institucional www.usco.edu.co, link Sistema Gestión de Calidad. La copia o impresión diferente a la publicada, será considerada como documento no controlado y su uso indebido no es de responsabilidad de la Universidad Surcolombiana.

SOFTWARE requerido y/o especializado para la lectura del documento: No

MATERIAL ANEXO: No

PREMIO O DISTINCIÓN (*En caso de ser LAUREADAS o Meritoria*): No

PALABRAS CLAVES EN ESPAÑOL E INGLÉS:

Español	inglés	Español	Inglés
1. Distorsión	Distortion	6. Ancho de Banda	Bandwidth
2. Retardo	Delay	7. Filtro	Filter
3. Compresor	Compressor	8. Ganancia	Gain
4. Frecuencia	Frequency	9. Reverberación	Reverb
5. Pedalera	Stompbox	10. Señales	Signals

RESUMEN DEL CONTENIDO: (Máximo 250 palabras)

El propósito de este trabajo es desarrollar una pedalera que permita la conversión de un violonchelo acústico en uno eléctrico, así como la ampliación de una gama de efectos sonoros a través de filtros y amplificadores aplicados a la experimentación de sonidos, de manera rápida y confiable, como herramienta de apoyo para la adecuación de piezas musicales con diferentes estilos. Para ello se dividió el proyecto en cuatro (4) fases: (1) Búsqueda de materiales, selección y adecuación de los diferentes estándares de frecuencias del violonchelo, (2) simulación y selección de los planos de cada uno de los filtros y amplificadores, (3) Implementación de cada uno de los efectos (4) ensayos y corrección de fallas. En esta última etapa, se evaluó el desempeño de cada uno de los efectos con su respectiva caracterización.

ABSTRACT: (Máximo 250 palabras)

The purpose of this work is to develop a pedalboard that allows the conversion of an acoustic cello into an electric one, as well as the expansion of a range of sound effects through filters and amplifiers applied to sound experimentation, quickly and reliably, as a support tool for the adaptation of musical pieces with different styles. For this, the project was divided into four (4) phases: (1) Search for materials, selection and adaptation of the different frequency standards of the cello, (2) simulation and selection of the planes of each one of the filters and amplifiers, (3) Implementation of each one of the effects (4) tests and correction of failures. In this last stage, the performance of each one of the effects was evaluated with its respective characterization.

	UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA GESTIÓN DE BIBLIOTECAS							
DESCRIPCIÓN DE LA TESIS Y/O TRABAJOS DE GRADO								
CÓDIGO	AP-BIB-FO-07	VERSIÓN	1	VIGENCIA	2014	PÁGINA	4 de 4	
						ICONTEC ISO 9001	ICONTEC ISO 14001	ICONTEC ISO 45001
						ISO 27001	ISO 22000	ISO 50001

APROBACION DE LA TESIS

Firma:

Nombre Jurado: José de Jesús Salgado Patrón

Firma: Fernand Díaz Franco

Nombre Jurado: Fernand Díaz Franco

Vigilada Mineducación

La versión vigente y controlada de este documento, solo podrá ser consultada a través del sitio web Institucional www.usco.edu.co, link Sistema Gestión de Calidad. La copia o impresión diferente a la publicada, será considerada como documento no controlado y su uso indebido no es de responsabilidad de la Universidad Surcolombiana.

**DESARROLLO E IMPLEMENTACIÓN DE PEDALERA ELECTRICA
PARA VIOLONCHELO**

DAVID FERNANDO R. A. CUELLAR RAMOS

LUIS EDUARDO GUTIERREZ ANTOLINEZ

**UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA
NEIVA, HUILA
2022**

**DESARROLLO E IMPLEMENTACIÓN DE PEDALERA ELECTRICA PARA
VIOLONCHELO**

DAVID FERNANDO R.A. CUELLAR

LUIS EDUARDO GUTIERREZ ANTOLINEZ

**Proyecto de grado presentado para optar el título de
INGENIERO ELECTRÓNICO**

Director
MARTIN DIOMEDES BRAVO
Ingeniero electrónico
Magíster en electromagnetismo, líneas y antenas

**UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA
NEIVA, HUILA
2022**

Nota de aceptación:

Firma del Director

Firma del Evaluador 1

Firma del Evaluador 2

Neiva, Julio 9 de 2022

Dedicado a mis padres, Augusto Cuellar y Amparo Ramos, por su afecto, orientación y apoyo incondicional a lo largo de mi vida. A mis tíos Angela Cuellar, Socorro Cuellar, Rosa Cuellar, Cielo Cuellar por haber sido partícipes de todo este proceso. A Francisco Guzmán, Sergio Manchenno y Natalia Muñoz por sus buenos consejos, por su confianza y su apoyo. A Dios por que sin el nada de esto hubiera sido posible. A Sandra Montero, por su amor y plena confianza en mis capacidades. Todos ellos pilares importantes para el desarrollo de mis metas.

David Fernando Rafael Augusto Cuellar

Dedicado a mis Padres, A mis maestros, A mis ancestros y al Gran Arquitecto quienes me dieron las lecciones que debía aprender para llegar este destacado momento.

Luis Eduardo Gutiérrez Antolínez

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan sus agradecimientos:

Al ingeniero MSc. Martin Diomedes Bravo, por poner a nuestra disposición sus conocimientos y darnos la orientación necesaria para el desarrollo de este proyecto.

Al Ingeniero Francisco Guzmán por sus recomendaciones en las etapas iniciales del proyecto.

Al cuerpo docente del programa de Ingeniería Electrónica de la Universidad Surcolombiana, por brindarnos una excelente formación académica.

A cada uno de los integrantes de nuestras familias, y amigos por depositar su confianza, tolerancia y apoyo a quienes hicieron parte de este proceso.

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
0. INTRODUCCIÓN	16
1. JUSTIFICACIÓN	17
2. OBJETIVOS	17
2.1 OBJETIVO GENERAL	17
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	17
3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	18
4. MARCO TEÓRICO	19
4.1 CONCEPTOS DE UNA SEÑAL SONORA	19
4.1.1 Señal sonora	19
4.1.2 Armónico	19
4.1.3 Octava	19
4.1.4 Afinacion	19
4.2 CONCEPTOS DE UNA SEÑAL DE AUDIO	20
4.2.1 Tono	20
4.2.2 Brillo	20
4.2.3 Timbre	21
4.2.4 Saturación	21
4.2.5 Ecualización	21
4.2.6 Sonido seco	22
4.2.7 Sonido húmedo	22
4.3 VIOLONCHELLO	22
4.4 EFECTOS DE SONIDO	23
4.4.1 Efecto distorsión	23
4.4.2 Efecto reverb	23
4.4.2.1 Historia	23
4.4.2.2 Tipos de reverb	24
4.4.3 Efecto delay	24
4.4.3.1 Historia	25
4.4.4 Efecto compresor	26
4.4.4.1 Historia	30

4.4.4.2 Tipos de compresion	31
5. DESARROLLO DE LA SOLUCIÓN	32
5.1 ADQUISICIÓN DE LA SEÑAL DE AUDIO Y CARACTERIZACIÓN	32
5.1.1 Adquisición de la señal de audio	32
5.1.2 Caracterización	33
5.2 DISEÑO	33
5.2.1 Pedal de efecto distorsión	34
5.2.2 Pedal de efecto compressor	39
5.2.2.1 Etapa de amplificación dependiente de voltaje	43
5.2.2.2 Etapa del filtro pasabanda	43
5.2.2.3 Etapa de modulación	44
5.2.3 Pedal de efecto delay	45
5.2.3.1 Bloque de potencia	46
5.2.3.2 Bloque de entrada y ganancia	46
5.2.3.3 Bloque del integrado pt2399	40
5.2.3.4 Bloque de salida	56
5.2.4 Pedal de efecto reverb	57
5.2.4.1 Etapa de entrada	58
5.2.4.2 Etapa de alimentación	59
5.2.4.3 Etapa de reverb (BTDR-2H)	60
5.2.4.4 Etapa de salida	61
5.3. IMPLEMENTACION DEL HARDWARE	52
6. ANÁLISIS DE RESULTADOS	64
6.1 EFECTO DISTORSION	64
6.2 EFECTO COMPRESSOR	67
6.3 EFECTO DELAY	70
6.4 EFECTO REVERB	71
6.5 EFECTO DISTORSION + COMPRESOR + REVERB + DELAY	72
7. CONCLUSIONES	73
8. RECOMENDACIONES	74
9. BIBLIOGRAFÍA	75
ANEXOS	78

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Relacion Volumen-Ganancia-Salida efecto distorsion.	37
Tabla 2. Frecuencia VCO vs Tiempo de retardo.	48
Tabla 3. Lista de materiales, recursos y equipos.	57

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Señal sonora matematicamente expresada.	23
Figura 2. Partes de un violonchello.	25
Figura 3. Tipos de clipping.	26
Figura 4. Plate reverb EMT 140 clone.	27
Figura 5. Reverb Tank-Belton 8EB2C1B medium decay.	27
Figura 6. Behringer DR 600 digital reverb.	28
Figura 7. Convolution reverb y Web Audio API.	28
Figura 8. T-rex Replicator delay	29
Figura 9. Morley RWV.	30
Figura 10. Esquema del proyecto.	33
Figura 11. Esquema de bloques el efecto distorsión.	34
Figura 12. Circuito del efecto distorsión.	35
Figura 13. Simulacion de salida. Distorsion 100% Ganancia 100%	37
Figura 14. Etapa del efecto compresor.	38
Figura 15. Circuito electrico del efecto compresor.	39
Figura 16. Simulacion de salida compresor. F=500Hz, umbral=50%, A=5V	42
Figura 17. Circuito del efecto delay.	43
Figura 18. Bloque de suministro de potencia.	44
Figura 19. Bloque de entrada y de ganancia.	46
Figura 20. Diagrama de Bode en banda media y Fc para delay.	46

Figura 21. Diagrama interno de bloques del PT2399.	47
Figura 22. Pines de alimentacion del PT2399.	47
Figura 23. VCO interno del PT2399.	48
Figura 24. Bloque de entrada del PT2399.	49
Figura 25. Seccion de salida del PT2399.	50
Figura 26. Lazo de realimentacion.	51
Figura 27. Bloque de salida.	52
Figura 28. Circuito de efecto reverb.	53
Figura 29. Bloque de entrada efecto reverb.	54
Figura 30. Etapa de alimentación del efecto reverb.	56
Figura 31. Bloque de reverb con integrado BTDR-2.	57
Figura 32. Bloque de salida (sección mezcladora)	57
Figura 33. Esquema del PCB del efecto distorsión.	58
Figura 34. Esquema del PCB del efecto delay.	59
Figura 35. Esquema del PCB del efecto compresor.	59
Figura 36. Esquema del PCB del efecto reverb.	60
Figura 37. Detalle de la señal de audio con arco sobre la cuerda más grave.	60
Figura 38. Detalle de la señal de audio en pizzicato sobre cuerda SOL.	61
Figura 39. Detalle de la señal de audio en pizzicato sobre cuerda DO.	61
Figura 40. Armónicos sobre la cuerda RE.	62
Figura 41. Efecto distorsión con arco al 70% y ganancia al 80% sobre DO	62
Figura 42. Efecto distorsión al 70% y ganancia al 80% sobre DO pulsado	63
Figura 43. Armónicos con efecto distorsión al 50%, ganancia al 100%	63

Figura 44. Efecto compresor con arco sobre DO, umbral 80%, ganancia 100%	64
Figura 45. Efecto compresor umbral al 70% y ganancia al 100% sobre DO	64
Figura 46. Efecto delay sobre DO, eco al 40%, mix al 50% y repeat al 80%.	65
Figura 47. Efecto delay pizzicato, eco al 40%, mix al 50% y repeat al 80%.	65
Figura 48. Armónicos con delay sobre RE	66
Figura 49. Efecto reverb, gain=100%, reverb=50% sobre cuerda SOL	66
Figura 50. Efecto reverb, gain=100%, reverb=80% sobre cuerda SOL	67
Figura 51. Armónicos sobre SOL con efecto reverb	68
Figura 52. Señal de salida con todos los efectos en cascada sobre RE	68
Figura 53. Señal de salida con todos los efectos en cascada sobre RE +2"	69
Figura 54. Señal de salida con todos los efectos en cascada sobre RE +4"	69
Figura 55. Señal de salida con todos los efectos en cascada sobre RE +6"	70
Figura 56. Señal de salida con todos los efectos en cascada sobre RE +8"	70
Figura 57. Armónicos y fase con todos efectos en cascada sobre RE	71

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
Anexo A. Pedalera eléctrica para violonchello	78
Anexo B. Interfaz gráfica de usuario	78

GLOSARIO

Reverb: Anglicismo que hace referencia a el efecto producido por alguna clase de reverberación en el sonido.

Delay: Anglicismo que se usa para referirse al efecto de retardo en una señal.

Stomp: Anglicismo usado para referirse a un botón de 3 estados que se activa al pisarse.

Pedalera: Dispositivo electrónico utilizado para alterar el sonido de una fuente, por lo general de instrumentos eléctricos o electrónicos. Se utilizan frecuentemente en el suelo para dar libertad a las manos del interprete, encendiendo/apagando el dispositivo con ayuda de los pies, de allí su nombre.

RESUMEN

En la interpretación musical existe una diferencia muy marcada entre los sonidos producidos acústicamente y los que son generados eléctricamente. Ambos campos del sonido son utilizados para la producción y grabaciones musicales. En la industria musical ya se manejan diversas gamas de casi cualquier instrumento imaginable eléctrico o con alguna clase de amplificación sonora eléctrica. Es decir, instrumentos que fueron concebidos para ser eléctricos o electro-acústicos desde su misma fabricación y que permanecen así siempre. Con cierta amplificación se pueden añadir distorsiones sonoras producidas eléctricamente, mediante cualquier clase de filtro.

El propósito de este trabajo es desarrollar una pedalera que permita la conversión de un violonchelo acústico en uno eléctrico, así como la ampliación de una gama de efectos sonoros a través de filtros y amplificadores aplicados a la experimentación de sonidos, de manera rápida y confiable, como herramienta de apoyo para la adecuación de piezas musicales con diferentes estilos. Para ello se dividió el proyecto en cuatro (4) fases: (1) Búsqueda de materiales, selección y adecuación de los diferentes estándares de frecuencias del violonchelo, (2) simulación y selección de los planos de cada uno de los filtros y amplificadores, (3) Implementación de cada uno de los efectos (4) ensayos y corrección de fallas. En esta última etapa, se evaluó el desempeño de cada uno de los efectos con su respectiva caracterización. Por último, se diseñaron las cajas metálicas donde quedaron finalmente instalados cada uno de los pedales.

Palabras clave:

Delay, Distorsión, Compresor, Eco, pedal, PCB, ondas sonoras, caja portable, filtros analógicos, amplificación, armónico, ganancia.

ABSTRACT

In musical performance there is a very marked difference between the sounds produced acoustically and those that are generated electrically. Both fields of sound are used for music production and recordings. The music industry already handles various ranges of almost any imaginable electric instrument or with some kind of electric sound amplification. That is to say, instruments that were conceived to be electric or electro-acoustic from their manufacture and that remain that way forever. With some amplification, electrically produced sound distortions can be added using any kind of filter.

The purpose of this work is to develop a pedalboard that allows the conversion of an acoustic cello into an electric one, as well as the expansion of a range of sound effects through filters and amplifiers applied to sound experimentation, quickly and reliably, as a support tool for the adaptation of musical pieces with different styles. For this, the project was divided into four (4) phases: (1) Search for materials, selection and adaptation of the different frequency standards of the cello, (2) simulation and selection of the planes of each one of the filters and amplifiers, (3) Implementation of each one of the effects (4) tests and correction of failures. In this last stage, the performance of each one of the effects was evaluated with its respective characterization. Lastly, the metal boxes where each of the pedals were finally installed were designed.

Keywords:

Delay, compressor, Echo, pedal board, Acoustic Signals, PCB's, portable box, amplification, analog filters, gain, frequency.

0. INTRODUCCIÓN

La apreciación musical ha sido una de las características culturales inherentes al concepto de “Humanidad”, el hombre es el único ser (con excepción de algunos mamíferos evolucionados como la ballena, delfines y/o elefantes) con capacidad cultural para ser sensibles a la música; sin embargo, esto está siendo reevaluado dado que ‘todos’ los organismos son ‘sensibles’ a las ondas sonoras, así sea solo en un espectro de frecuencias determinado. Los organismos más ‘evolucionados’, requieren de ciertas “recreaciones estéticas” y estas a su vez imponen a la tecnología y el desarrollo nuevas formas funcionales y artísticas de concebir el deleite musical.

La Humanidad, desde los remotos tiempos de sus orígenes, ha experimentado con sonidos en múltiples ambientes en el que se encuentre: conchas de mar y moluscos para los que habitan cerca al mar; cavidades o cuencos de cuarzo y metal para los pueblos mineros; castañuelas y pedazos de hueso para otra clase de pobladores, hasta partes del propio cuerpo que han sido incluso modificadas y deformadas para la ejecución musical como sucede en algunas tribus africanas septentrionales¹. Se ha hablado incluso de la musicoterapia y hasta de ‘armas sonoras’. Ya hasta se ha concebido y desarrollado el concepto de ‘escultura o arquitectura sonora’.

En la época moderna, el campo de la electrónica no ha sido ajeno, y de hecho ha sido un factor desarrollador y de estudio desde que en la primera década del pasado siglo XX se implementó el primer distorsionador eléctrico para guitarra², pasando por el diseño del primer piano eléctrico que daría paso a los modernos sintetizadores, hasta el invento de instrumentos como el Ondas Martenot³. Tan pronto como la guitarra eléctrica hizo su incursión, otros instrumentos fueron apegándose a la moda imperante de volverse también eléctricos (teclados, drums, violines, etc.). Inicialmente los primeros efectos hechos a base de electrónica fueron concebidos como la saturación de los amplificadores de señal, y por supuesto, fueron indeseables para la época; sin embargo, gracias a la experimentación, la evolución del modernismo, afortunados errores y el análisis de señales, se encontró una infinita gama de efectos de sonido producidos por un filtro eléctrico en particular.

Ahora existen varias pedaleras comerciales para guitarras y bajos; y los instrumentos de cuerda frotada eléctricos presentan un costo alto de adquisición. Sin embargo, poco se ha hecho para desarrollar amplificadores y distorsionadores que permitan convertir uno de estos instrumentos acústicos, en este caso un violonchelo, en uno eléctrico y así ampliar su gama de sonidos y efectos.

¹ The Evolution of Rhythm Cognition: Timing in Music and Speech. Andrea Ravignani, Henkjan Honing, Sonja A. Kotz. Frontiers Research Topics. [Consultado el 18 de julio del 2019] Disponible en: (<https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fnhum.2017.00303/full>)

² Historia de la guitarra: Descubrimiento de la distorsión. [Consultado el 22 de julio del 2019]. Disponible en: <https://www.usroasterie.com/historia-de-la-distorsion-de-la-guitarra.html>

³ A cerca del instrumento ‘Ondas Martenot’. [Consultado el 22 de septiembre del 2019]. Disponible en: <https://www.britannica.com/art/ondes-martenot>.

1. JUSTIFICACIÓN

La música es fundamental para el ser humano al constituir una vía natural de expresión y comunicación que permite la interacción personal y la afirmación de la identidad individual y colectiva. Por ello, la música supone una herramienta indispensable de aplicación para el desarrollo integral del individuo. Mediante su poder comunicativo la música es capaz de provocar un impacto en el ser humano pudiendo llegar a influir en su estado de ánimo comportamiento y toma de decisiones⁴.

En la interpretación musical existe una diferencia muy marcada entre los sonidos producidos acústicamente y los que son generados eléctricamente. Ambos campos del sonido son utilizados para la producción y grabaciones musicales. Sin embargo, desde la segunda mitad del siglo XX el campo musical eléctrico y electrónico ha ganado más terreno que simplemente una amplificación y ecualización adecuadas, y está haciéndose presente en muchos escenarios hasta el punto de generar prácticamente todos los sonidos en un concierto incluida la percusión (como lo han demostrado agrupaciones como Kraftwerk, Depeche Mode, Underworld o Charly García), por no hablar de los matices que se desprendieron a partir de esto.

En el ambiente musical la búsqueda de nuevos sonidos impulsa la creación de nuevos instrumentos y nuevas formas de interpretación y recreación musicales. Se busca generar nuevos sonidos a partir de señales acústicas estándares y conocidas por el público en general. Es decir que a partir de un violonchelo básico se puedan generar al menos una gama de sonidos y/o efectos distintos. Sin embargo, a pesar de que los diseños sean generados para procesar señales de sonido en el ancho de banda acústico de un violonchelo no significa que no pueda ser usado por cualquier otro instrumento en cuestión (en principio de registro similar al del violonchelo).

Esta propuesta es estimulada por la necesidad de utilizar elementos electrónicos para mejorar el sonido de las señales producidas por el violonchelo acústico.

Este proyecto se enfocará en el tratamiento de señales sonoras mediante la contribución de los filtros y amplificadores electrónicos analógicos aplicados a la experimentación de sonidos, que permitirá dar un mejor enfoque y mayores expectativas en la búsqueda de producción musical y la expansión de tecnologías innovadoras que contengan enfoques eléctrico-musicales. Se plantea un dispositivo portable que sea capaz de convertir un violonchelo acústico en uno eléctrico con diferentes efectos sonoros. Para este cometido se propone un dispositivo que distorsione, amplifique y ecualice el sonido de un violonchelo mediante la aplicación de filtros analógicos.

⁴ Percepción de Emociones en la música: Un estudio de la influencia del parámetro musical 'duración'. [Consultado el 2 de agosto del 2019]. Disponible: <https://ruidera.uclm.es/xmlui/bitstream/handle/10578/15271/TESIS%20Fern%C3%A1ndez%20Sotos.pdf?sequence=1&isAllowed=true>

2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVO GENERAL

Diseñar e implementar un prototipo de pedalera eléctrica para un violonchelo acústico, con el propósito de mejorar la ecualización y generar una gama de efectos diferentes de sonido.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- ✓ Realizar un estudio de los rangos de frecuencias característicos del violonchelo e identificar las estrategias de modificación para lograr efectos tales como reverb, delay, distorsión y compresor.
- ✓ Definir una gama de efectos musicales a través del tratamiento analógico de señales acústicas de un violonchelo.
- ✓ Realizar el diseño digital del sistema (pedalera) y simular su funcionalidad teniendo en cuenta los diferentes componentes necesarios en su implementación.
- ✓ Implementar el diseño validado en hardware de las diferentes etapas para un prototipo analógico de pedalera portable.

3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Desde la creación de los instrumentos eléctricos se ha pretendido experimentar con toda clase de efectos sonoros y ruidos. Quizás el ejemplo arquetípico de instrumento musical eléctrico sea la guitarra eléctrica; sin embargo, no ha sido el único instrumento convertido plenamente a uno eléctrico, se tiene la guitarra bajo eléctrica (el conocido bajo eléctrico), el contrabajo convertido plenamente en uno eléctrico, los violines, las violas e incluso el violonchello eléctricos, así como el piano y el órgano ya se han vuelto eléctricos y electrónicos.

Para instrumentos de viento aún se conserva el método de adquirir su sonido con un micrófono de contacto externo, por lo tanto, no existe en el mercado un instrumento tal como una trompeta o un corno o clarinete (propriamente) eléctricos, o al menos son muy raros y para nada producidos en serie y masivamente. Sin embargo, en esta investigación del estado del arte no se vislumbró ningún trabajo sobre convertir un violonchello acústico a uno eléctrico análogo, con efectos sonoros en forma de pedalera diseñada específicamente para el registro sonoro de este instrumento. Solo existía la típica amplificación con micrófono externo.

Durante algunos años se experimentó con violonchello en música clásica y alternativa pop, y se hizo evidente que, al ensamblarlo con guitarras eléctricas, bajos eléctricos y batería, su sonido quedaba opacado, ocultado y hasta distorsionado, sobre todo en presentaciones en vivo. Así mismo por el amplio registro frecuentemente es utilizado como bajo, pero también como instrumento lírico, así que es necesario una especie de ecualización sonora. Aun así, el instrumento quedaba relegado a solo hacer líneas y melodías limitadas para aprovechar su sonido único (por ejemplo, para los sonidos bajos ya existe el bajo, y para sonidos agudos y líricos existen una amplia gama de instrumentos entre los que destacan la guitarra, el violín o la flauta). Todo esto ha quedado cristalizado en la idea de una pedalera de efectos para el instrumento puesto que cumpliría la misión de ecualizar, amplificar, controlar y darle efectos sonoros distintos al sonido original del violonchello. En otras palabras: versatilizar el comportamiento de un violonchello.

FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

Por lo tanto, es válido plantear la siguiente pregunta de investigación: ¿Es posible convertir un violonchello acústico en uno eléctrico ecualizado a través de una pedalera de efectos?

4. MARCO TEÓRICO

4.1 CONCEPTOS DE UNA SEÑAL SONORA

4.1.1 Señal sonora.

Básicamente es una onda de presión de aire alternante que los oídos perciben y el cerebro interpreta como un chillido o mejor, un sonido; vale la pena recordar que también se puede 'escuchar' una onda sonora con las diferencias de presión sobre la superficie cutánea, como se ha percibido cotidianamente en algún concierto o música con fuerte amplificación de los sonidos bajos.

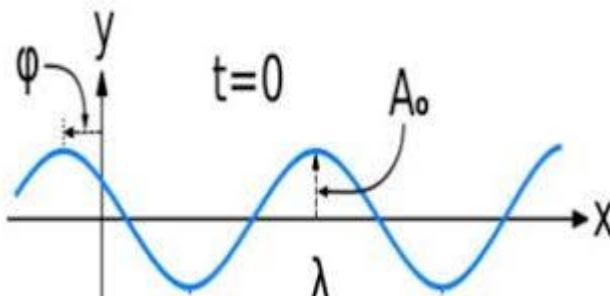
Esta señal de sonido es en esencia una señal senoidal⁵. Si se altera la amplitud A_0 de su onda esto será percibido como un aumento en el volumen sonoro de dicha señal. Si se altera su frecuencia (o sea, alterar su longitud de onda λ) esto será percibido por los oídos como un cambio en el tono -si aumenta la frecuencia será agudo, si baja la frecuencia será grave-, y si se desfaza simplemente se percibirá como un adelanto o como un atraso en la reproducción del sonido.

Ver Figura 1.

$$Y(x,t) = A_0 \operatorname{Sen} ((2\pi ft - 2\pi x/\lambda) + \phi), \quad (\text{Ecuación 1})$$

en donde t representa el tiempo en el eje X

Figura 1. Señal sonora matemáticamente expresada



Fuente: [wikicommons.org](https://www.wikicommons.org) (<https://www.lifeder.com/wp-content/uploads/2019/08/onda-senoidal1.jpg>)

4.1.2 Armónico.

En la naturaleza el concepto de frecuencia está presente en todos los fenómenos, aunque en apariencia no tengan un desempeño musical, por ejemplo, la frecuencia crítica de un puente vehicular.

La inducción de un sonido mediante la resonancia acústica es también un fenómeno presente en el campo sonoro, y es precisamente la base de la explicación de un armónico. Un armónico se les dice a aquellas frecuencias que son armónicas de

una frecuencia fundamental particular, esto significa que son múltiplos enteros de dicha frecuencia fundamental.

En la práctica se puede evidenciar este fenómeno cuando se pulsa una cuerda del piano y algunas otras cuerdas vibran solas por el solo efecto resonante de la primera cuerda pulsada; esto sucede así porque estas cuerdas son armónicos de la cuerda pulsada. Son estos armónicos los que le dan su timbre y sonidos característicos a cada instrumento, así como dejan la impronta de su espectro sonoro característico.⁵

4.1.3 Octava.

Se le denomina así a una nota que está al doble (si es más alta) o a la mitad de la frecuencia (si es más grave) de una nota específica.⁶ Por ejemplo, desde un DO grave al siguiente DO más agudo existe una ‘octava’ de diferencia puesto que de DO a DO siempre hay ocho notas.

En el canon musical se estableció una escala sonora aproximadamente centrada en el espectro audible humano, en donde se señalan las notas con un número para indicar el número de octava a la que pertenecen en dicho espectro. Siendo así el primer DO (o DO fundamental: 16.35 Hz) o DO (0) la nota más baja, y la nota más alta un DO (10) o décima octava de DO (a 16.74404 KHz) en afinación 440.

4.1.4 Afinación.

Los variados instrumentos que existen pueden tener y por lo general tienen diferentes tonos o ‘afinaciones’. Este concepto hace referencia a un canon o medida patrón para uniformizar y amalgamar los sonidos de todos los instrumentos que van a hacer parte de una pieza musical. Entonces la afinación suele darse en torno a una frecuencia específica (o número de vibraciones por segundo) de una nota que es relativamente central dentro del registro audible.

Por lo general y por comodidad técnica se impuso durante el siglo XX la afinación alrededor de la nota musical LA (4) en 440 ciclos. Entonces todos los instrumentos que se vayan a tocar en una pieza musical deberán tener sus notas fundamentales afinadas en múltiplos enteros de dicho LA en 440 Hz. Pero también se podrían afinar todos esos instrumentos en un LA en 432 Hz o 450 Hz o en 425 Hz, o sobre cualquier rango de frecuencias aproximadamente definidas para la nota LA (4).⁷

⁵ Conceptos básicos de teorías de cuerdas. [Consultado el 18 de junio del 2019] Disponible en: <https://www.doctorproaudio.com/doctor/temas/fase.htm#:~:text=La%20onda%20senoidal%20es%20aquella,b%C3%A1sicamente%20tiene%20s%C3%B3lo%20una%20frecuencia>.

⁶ La matemática de la música. Hoyos H., Diego L. Matemáticas: Enseñanza Universitaria, vol. XX, núm. 1, 2012, pp. 29-48 Escuela Regional de Matemáticas Cali, Colombia.

^{7,8} «AFINACIÓN». Conceptos básicos de teorías de cuerdas. [Consultado el 28 de diciembre de 2021].

^{9 10 11 12 13} Tecnología de los contenidos multimedia. Capítulo 4. La señal de audio. UNED curso 2009.

4.2 CONCEPTOS DE UNA SEÑAL DE AUDIO

Durante la evolución de la amplificación eléctrica en la música comercial se empezaron a bautizar dentro de la jerga común musical, toda una serie de términos para hacer alusión cualitativa a conceptos tan abstractos o difíciles de comunicar, como ‘brillo’, ‘cuerpo’, ‘timbre’, ‘sonido seco’, ‘sonido mojado’, ‘tono’, ‘sustain’ o ‘sonido cargado’, entre otros.

4.2.1 Tono.

Se refiere al grado de elevación del sonido que depende de la cantidad de ciclos o vibraciones por segundos.^{8 9}

4.2.2 Brillo.

Se le denomina así a cierta cualidad sonora que sugiere un sonido más agudo, y más articulado junto con mejor nitidez y definición entre las notas. Se les suele asociar a un sonido que puede ‘llenar’ un espacio.¹⁰

4.2.3 Timbre.

Se refiere a una cualidad del sonido de un instrumento que permite distinguirlo de otro sonido del mismo tono.¹¹

4.2.4 Saturación.

En el ámbito electrónico se refiere específicamente a como un amplificador trabaja. En el ámbito musical, un sonido ‘saturado’ se refiere a un sonido recortado, como sordo y a la vez recargado; es por esto que también suele llamársele ‘sonido recargado’ a un sonido saturado.¹²

4.2.5 Ecualización.

Ecualizar es disminuir o estimular frecuencias sonoras concretas (o un rango de frecuencias) en el espectro general de frecuencias. Un ecualizador divide este espectro en secciones (bandas), que se usan para recortar o aumentar partes de su sonido. Por lo tanto, un sonido “bien ecualizado” significa que sus frecuencias bajas, medias y altas están bien equilibradas, se pueden escuchar perfectamente y ninguna oculta a la otra.¹³

4.2.6 Sonido seco.

Se refiere a la señal sonora original, sin modificaciones o procesos que la hayan alterado de alguna forma.¹⁴

4.2.7 Sonido mojado.

Se refiere a la señal sonora ya procesada o modificada con respecto a la señal original.¹⁵

4.3 VIOLONCHELLO (CHELO)

Es un instrumento de cuerda frotada de la familia de los violines (o *cordófonos*), desarrollado e inventado en el siglo XVI en Europa. Su tamaño, mucho mayor que el de un violín, hace que el ejecutante esté sentado, y se ajusta su altura con el pivote o pica.

Características generales

El violonchello posee cuatro cuerdas afinadas por quintas justas. Generalmente se toca con un arco, aunque también funciona pulsando las cuerdas (*pizzicato*).

Su primera cuerda (la más delgada o aguda) es un La (3) a 220 Hz; su segunda cuerda es un Re (3) a 146.8 Hz, su tercera cuerda es un SOL (2) a 98 Hz, y la cuarta cuerda (la más gruesa o grave) es un DO a 64.5 Hz, en afinación de 440Hz.

Su registro sonoro es muy parecido al registro de la voz humana y por esto puede actuar como un bajo continuo o como instrumento que lleva la melodía en una agrupación u orquesta.¹⁶

Figura 2. Partes de un violonchello



Fuente: [wordpress.com \(https://losinstrumentosmusicales.wordpress.com/instrumentos-de-cuerda/corda-fregada/violoncel/\)](https://losinstrumentosmusicales.wordpress.com/instrumentos-de-cuerda/corda-fregada/violoncel/)

^{14 15} Diferencia entre sonidos húmedo y seco. [Consultado el 25 de junio de 2022]. Disponible en: https://es.differbetween.com/article/difference_between_wet_and_dry_signals_or_sounds.

¹⁶ Chello C. [Consultado el 25 de junio de 2022]. https://www.vsl.co.at/en/Cello/Sound_Characteristics.

También se caracteriza porque las cuerdas transmiten la vibración de las ondas sonoras al cuerpo del instrumento mediante un puente de madera entre ellos, sostenido por la presión de las cuerdas tensionadas contra el cuerpo (ver *Figura 2*).

4.4 EFECTOS DE SONIDO

4.4.1 Pedal de efecto Distorsión.

Esta clase de pedal es la más antigua de todas las formas de distorsión eléctricas, pues comenzó como un efecto indeseable de saturación en los viejos amplificadores, ya sea por maltrato o mal uso – a veces un golpe dañaba la bocina y la saturación se producía por causa mecánica-, o por el desgaste de los dieléctricos de los capacitores o de la juntura de los tubos al vacío y transistores (la humedad, la salinidad, el ambiente, las condiciones de fabricación producían el mismo efecto de saturación pero en este caso por causa eléctrica).

Los pedales de distorsión se pueden desarrollar a partir de válvulas termoiónicas, transistores, amplificadores operacionales o simplemente a partir de diodos (cuyo desempeño no aporta ganancia).

Existen varias clases de este efecto distorsión y se clasificarán solo las principales:

- ***Tape saturation (saturación de cinta).***

Este tipo de saturación combina el suavizado transitorio, la compresión y la distorsión suave de la señal para juntar y ‘engordar’ progresivamente la señal. Las emulaciones a menudo aplican ecualización, silbidos y aleteos de cinta simulados.

- ***Valve saturation (saturación de válvula).***

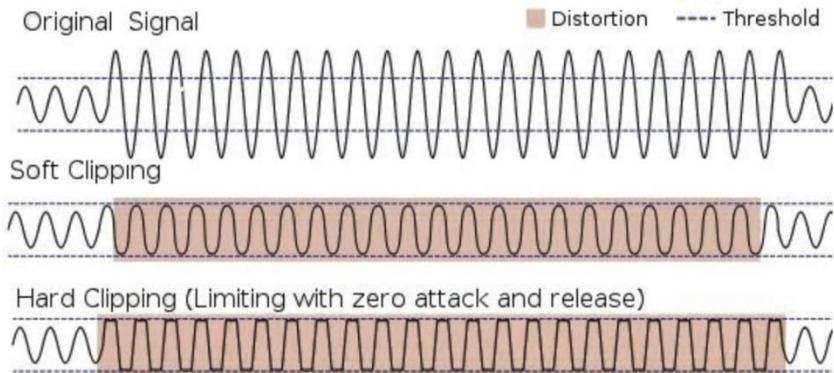
Es muy parecido al anterior. También agrega calidez y cohesión a la señal de audio, pero funciona un poco diferente en comparación. La saturación generalmente se usa sutilmente, en lugar de llevarla al punto de una distorsión obvia, aunque siempre es una opción y gusto estético.¹⁷

- ***Clipping (recorte).***

El ‘clipping’ se refiere al efecto de guitarra eléctrica que se ha llamado así con el tiempo. El efecto *clipping* o recorte se presenta cuando el audio es más alto y más ‘ruidoso’ que el nivel que puede manejar el amplificador o sistema de sonido. En algunos casos, es posible que se deseé a propósito agregar una cantidad muy pequeña de recorte pues suena duro, sucio y vanguardista. Además, también puede agregar un crujido fresco al sonido de la batería o aumentar las frecuencias más altas del bombo o bajo sin alterar las frecuencias más bajas. De cualquier manera, las señales representativas de *clipping* se pueden apreciar en la Figura 3.

¹⁷ Tipos de distorsión. [Consultado el 15 de junio de 2022.] <https://www.armadamusic.com/university/music-production-articles/distortion-explained>

Figura 3. Tipos de Clipping



Fuente: Wikimedia.org (https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/c/ca/Clipping_waveform.svg/710px-Clipping_waveform.svg.png)

- **Overdrive.**

Este es el tipo de distorsión más conocida porque está a medio camino entre una distorsión dura y pronunciada, y una tenue y suave. Por esto también se le llama “soft clipping”, pues data de la época en que intencionalmente se sobrecargaban (de ahí el ‘overdrive’) los amplificadores para producirlo. Este efecto ayuda a conservar parte del rango dinámico de la señal de audio y aún se pueden obtener sonidos relativamente limpios. Simplemente agrega ‘agresión’ al darle a los matices un empujón extra.¹⁸

4.4.2 Pedal de Efecto *Reverb*.

El efecto reverberación es un efecto particular que adquieren los sonidos al ser escuchados en un cuarto amplio (pero confinado) y/o con ciertas disposiciones geométricas, como en una catedral o dentro de un baño enchapado; producido por las ondas sonoras que rebotan y se devuelven en las superficies. Los cerebros están acostumbrados a escuchar estos reflejos en la vida real y, por lo tanto, agregarlos artificialmente a las grabaciones que permiten percibir que el sonido proviene de un entorno determinado.¹⁹

El *reverb* es un efecto relativamente contrario al de un sonido limpio, que insinúa cierto *delay* o eco pero que no alcanza a llegar a ellos; es un sonido que ‘reverbera’ como el sonido de un redoblante (sobre todo si posee una malla entorchada de metal encima de su parche) que parece persistir unos pequeños instantes después de cesar el golpe.

¹⁸ The effects of distortion: *Investigating how different types of distortion affect timbral attributes and subjective preference*. Lézin, André Waldton. Audio Technology, bachelor's level. Luleå University of Technology. Department of Arts, Communication and Education. 2020.

¹⁹ Handbook of recording engineering. Eargle, Jhon M. 4ta edición. Birkhäuser. 2005.

4.4.2.1 Historia.

Los enfoques iniciales de estudio para la reverberación se limitaban a trabajar con (o tratar de controlar) la habitación en la que se estaba capturando una actuación en vivo. El primer uso "creativo" de la reverberación (¡usando el baño del estudio para tal fin!) en un disco pop fue obra de *The Armonicats* 'Peg O' My Heart' (1947). Sin embargo, lo que buscaban los ingenieros de estudio era un sistema en el que se pudiera agregar y controlar la reverberación a una grabación seca.

Esto vino con el desarrollo del pedal *Plate Reverb* -esencialmente una placa de metal vibrante en una caja- fue presentado en 1957 por la compañía alemana EMT y se convirtió en una forma popular de crear reverberación en el estudio. Sin embargo, la tecnología de reverberación de placas no es práctica para llevar al escenario, por lo que el siguiente avance fue la creación de sistemas basados en resortes integrados en los amplificadores de guitarra.

Los efectos de reverberación digital emulan reverberaciones de sala (sala/espacio grande), sala, placa y resorte, ya sea en pedales o unidades de rack. Las primeras reverberaciones digitales no eran portables, estaban vinculadas al estudio, como por ejemplo el EMT 250 (1976) y el icónico 224 de Lexicón (1978).

Ahora hay innumerables modelos portables en el mercado, todos ofrecen su propio giro sobre los mismos principios: el de replicar reverberaciones naturales (a menudo agrupadas como, por ejemplo, sonidos tipo iglesia, salón, habitación) y el carácter de las reverberaciones mecánicas (plata y resorte).²⁰

4.4.2.2 Tipos de reverb.

Existen básicamente 5 grandes clases de reverberación:

- ***Echo chambers (eco de recamara).***

Llamado así porque el primer efecto *reverb* de la historia utilizaba esto al grabar en espacios reverberantes (como una recamara especial), por allá en los años 30's. Aquí no había nada de electricidad para producirlo. Sin embargo, con el tiempo se diseñarían efectos eléctricos que simularan esta clase de reverberación específica.

- ***Plate reverb (reverb de placa).***

Llamado así porque se basa en un transductor que crea vibraciones sobre una larga hoja metálica. El movimiento de la placa (*Figura 4*) es grabado por uno o más micrófonos de contacto cuya salida es una señal de audio que puede ser añadida a la señal original virgen.

²⁰ <https://www.musicradar.com/tuition/tech/a-brief-history-of-reverb-602421>. [Consultado en junio 27 de 2022].

Figura 4. Plate Reverb EMT 140 clone



Fuente: reverb.com (https://images.reverb.com/image/upload/s--UGL5-RwK--f_auto,t_large/v1534473540/ob1m5j8lnnmsh7wwbuzk.jpg)

- **Spring reverb (reverb de resortes).**

Fue introducido al mercado por Bell Labs, con un comportamiento parecido al anterior solo que con uno o más resortes (en lugar de una hoja metálica) colocados al final de un transductor y un pickup como se puede apreciar en la Figura 5.

Figura 5. Reverb Tank - Belton, 8EB2C1B, Medium Decay, 3-Spring



Fuente: reverb.com (https://images.reverb.com/image/upload/s--2UF8CQRK--f_auto,t_large/v1573662723/vhce37ri71e9jleum3vm.jpg)

- **Gated reverb (reverberación de compuerta).**

Este se produce al combinar el *reverb* clásico con el de una compuerta ruidosa creando un sonido ‘largo’ pero de ‘cola corta’. Este se inventó en los 70’s pero fue popularizado en la música pop de los 80’s en parte por Phil Collins y el ingeniero Hugh Padgham.²¹

²¹ "How Genesis's Peter Gabriel and Phil Collins stumbled upon the '80s gated-reverb drum sound". Stuart, Williams. [Consultado: 19 Diciembre 2020]. Disponible en: <https://www.musicradar.com/features/how-genesis-peter-gabriel-and-phil-collins-stumbled-upon-the-80s-gated-reverb-drum-sound>

- **Digital reverb (reverberación digital).**

Este efecto utiliza múltiples líneas de retardo con senderos que se desvanecen, dando la impresión de que el sonido rebota en las superficies. Algunos efectos digitales permiten a los usuarios ajustar de forma independiente los reflejos tempranos y tardíos. La reverberación digital fue introducida en 1976 por la compañía EMT con el EMT 250, y se hizo popular y portátil en la década de 1980.

Figura 6. Behringer DR600 Digital Reverb



Fuente: behringerstudio.com

(https://mediadl.musictribe.com/media/PLM/data/images/products/P0597/2000Wx2000H/DR600_P0597_Top_XL.png)

- **Convolution reverb (reverberación de convolución).**

Este *reverb* utiliza grabaciones digitales de lugares con alto contenido de este efecto que superpone estos con la grabación en marcha. Esto se utiliza sobre todo en la producción de películas o videos de música con ingenieros de sonido detrás de los mínimos matices que pueden ser añadidos en postproducción con reverberaciones realísticas. El primer procesador de reverberación por convolución en tiempo real - el DRE S777- fue anunciado por Sony en 1999²².

Figura 7. Convolution Reverb y Web Audio API



Fuente: wikicommons.org

(https://miro.medium.com/max/720/1*Cjq9OUC43BOZL4XOcbS-kA.png)

Este efecto aprovecha la función matemática delta Dirac y lo convoluciona con una función exponencial convergente a cero en el tiempo (amplitud vs tiempo), como se muestra en la figura 7. De esta forma el sonido queda repetido innumerables veces hasta atenuarse completamente.

²² digital reverb. [Consultado en junio 20 de 2022]. (<https://www.stockmusicmusician.com/blog/types-of-reverb>).

4.4.3 Pedal de efecto *Delay* (retardo).

Efecto único que es muy apreciado por los músicos, productores e ingenieros de sonido por su capacidad de brindar un eco (y hasta repetirlo varias veces) a la señal de audio²³.

4.4.3.1. Historia.

Este pedal de efecto tan particular se inventó finalizando la década de los 30's y se popularizó en los 40's y 50's con ayuda de músicos como Muddy Watters o el mismo Elvis Presley.

Sin embargo, desde la invención de las líneas telefónicas ya es familiar este efecto en el ámbito eléctrico, puesto que la naturaleza también puede emular esta particularidad en lugares con ciertas disposiciones geométricas y espaciales, entre otros²³.

Con el advenimiento de la grabación en cinta –en los años de 1920- las posibilidades tecnológicas del *delay* crecieron, aprovechando los milisegundos que le toma a la cabeza grabadora plasmar en la cinta el sonido previamente registrado. Así la longitud del *delay* dependía de la distancia entre la cinta y la cabeza grabadora. Toda esta tecnología de cinta permitió la creación de innumerables efectos novedosos a partir de este, como el *CopCat*, el *Echoplex* o el *Slapback* como en la figura 8.

Figura 8. T-Rex Replicator Delay



Fuente: [wikicommons.org \(<https://images.squarespacecdn.com/content/v1/5241856be4b07f248a5a2804/1485521249133-5ECZ91HNC21GQUVJTLW/T-Rex-Replicator-SLIDE-6.jpg?format=500w>\)](https://images.squarespacecdn.com/content/v1/5241856be4b07f248a5a2804/1485521249133-5ECZ91HNC21GQUVJTLW/T-Rex-Replicator-SLIDE-6.jpg?format=500w)

Después del dominio absoluto de los *delay* de cinta durante los 40's y 50's comenzaron a aparecer una clase exótica de estos construidos con aceite, a manera de dieléctrico que permitirá crear un *delay* único con *reverb* y cierto vibrato, debido a su forma y funcionamiento único.

²³ historia del Delay. [Consultado: 12 de abril de 2021].

<https://web.archive.org/web/20030402004518/http://www.harmony-central.com/Effects/Articles/Delay/>

Figura 9. Morley RWV



Fuente: [wikicommons.org](https://www.wikicommons.org) (<https://www.vintageguitar.com/14310/the-morley-rotating-wah/>)

Estas unidades albergan lo que pareciera ser una 'lata de atún' (Figura 9) llena de aceite que funciona como dieléctrico, es decir, puede almacenar una carga o señal. Un motor impulsa una correa de goma para hacer girar un volante equipado con una pastilla dentro de la lata. El aceite almacena señales electrostáticamente (en lugar de electromagnéticamente, como con una cinta) y la pastilla funciona como el cabezal de grabación, chapoteando en el aceite para producir eco. Las imperfecciones de este mecanismo de transporte le dieron al retardo de lata de aceite un sonido único que es una mezcla de reverberación y vibrato gorjeante²⁴.

4.4.4 Pedal de efecto Compresor.

Un "limitador" se concibe como un circuito que evita que la señal de salida exceda un cierto límite. Si hiciera esto recortando la onda (clipping) causaría distorsión, pero si puede hacerlo limpiamente reduciendo progresivamente la amplificación de la señal entrante, entonces puede llamarse correctamente compresor. Un compresor reduce el rango dinámico general "comprimiendo" la ganancia de las señales de gran amplitud mientras mantiene la ganancia de diseño para las señales de menor amplitud.

Los compresores están disponibles como controles de pedal y se pueden utilizar como efecto en señales de guitarra eléctrica, por ejemplo. Se pueden usar para obtener un mayor sonido sostenido de una cuerda ajustando la ganancia a un nivel alto y permitiendo que el compresor mantenga la señal de salida a un nivel más o menos constante hasta que el sostenido natural de la cuerda deje caer la señal por debajo de cierto umbral.

4.4.4.1 Historia.

Esta técnica de compresión que se utiliza en este pedal es tan antigua como el teléfono. Data de 1876, cuando idearon esta técnica para facilitar la comunicación

²⁴ <https://soundworkscollection.com/post/a-brief-history-of-sound-delay->. [Consultado en junio 10 de 2022].

y compresión de la señal de voz. A veces había usuarios muy ruidosos a tal punto que incomodaba al oído detrás de la bocina; así mismo había usuarios con voz suave y muy silenciosa y no se les entendía muy bien. Los ingenieros aplicaron esta técnica de compresión a esa señal de audio y subieron el volumen a la persona silenciosa y se lo bajaron a la persona ruidosa, nivelándolos en el centro.

En los primeros años de la década de 1930 se introdujo comercialmente el primer compresor hecho de amplificadores de válvulas, y no fue hasta la década de los 70's que la 'rompió' al volverse tremadamente popular como pedal portátil para guitarras y bajos eléctricos, dentro y fuera del estudio²⁵.

4.4.4.2 Tipos de compresión.

Básicamente existen 4 formas de compresión de una señal (de audio):

- **Compresión VCA.**

Este tipo de compresión está construido a partir de un amplificador controlado por voltaje y tiene muchísimas aplicaciones tanto comerciales, técnicas, comunicacionales y musicales. Este es el tipo de compresión más utilizado actualmente, tanto análoga como digitalmente. En el caso análogo la señal de audio le "dice" a todas las pistas del conjunto para que todas disminuyan el nivel en una igual cantidad.

Esta ruta de control puede ser manipulada por una gran cantidad de parámetros que hacen que estos procesadores funcionen de manera exacta, como: el ataque, el *reléase* (o tiempo en que el compresor se desactiva), el umbral (o *threshold*, es el nivel de voltaje a partir del cual se comprime la señal), y la relación (comparación entre la señal seca y la señal comprimida) a menudo se pueden ajustar a la perfección, lo que hace que el proceso sea más granular que otros compresores. Los ingenieros prefieren este tipo de compresión por su predictibilidad y repetitividad.

- **Compresión óptica.**

La idea básica de esta técnica es simplemente la misma que la de la compresión VCA solo que utilizando foto-resistores. La misma señal de audio será la señal de control, y esta misma señal será la que actúe sobre un LED acoplado a una foto-resistencia (directamente involucrada en la ganancia del amplificador) que va a alterar su valor de acuerdo a la intensidad de voltaje de la señal de audio (a mayor nivel de voltaje mayor nivel de volumen), de tal manera que los picos y los valles muy pronunciados quedan menos puntudos o más ecualizados.

²⁵Compresor y su desarrollo. [consultado el 10 de junio de 2022]. Disponible en: <https://www.fender.com/articles/tech-talk/effects-guide-compression-decompressed>.

El problema aquí es que esta interacción entre la fuente de luz y la resistencia, aunque rápida, no es instantánea. Además, diferentes tipos de fuentes de luz iluminan a diferentes velocidades, y una resistencia puede reaccionar de manera diferente según el material del que esté hecha.

Por esta razón, el comportamiento sónico de un compresor óptico depende en gran medida de los tipos de materiales utilizados en su construcción. Pero aquí hay algo en común entre ellos, sin importar la marca: el ataque y el *release* de un circuito óptico son (al menos la mayor parte del tiempo) definitivamente no lineales, a menudo esto implica un poco de retraso antes de que el ataque entre en acción, y un retraso adicional cuando el *release* cae.

- **Compresión por FET.**

Esta es otra técnica que utiliza las características físicas y de operación del campo eléctrico de un transistor FET (Field Effect Transistor). Consiste en el desarrollo del amplificador con un FET, con todas sus implicaciones. Esto permite mejores tiempos de ataque sin quitarles color a las notas, es decir, emula muy bien el desempeño y sonido finales producidos por un compresor hecho con tubos al vacío.

Por lo general estas configuraciones de amplificadores a partir de FET's están realimentadas, dependiendo del tipo de compresión lograda, porque las hace más robustas al ruido y perturbaciones, aunque disminuyan un poco su ancho de banda. Ejemplo de esto es que en este tipo de compresores no existe un control de umbral.

- **Compresión $\Delta-\mu$.**

Los compresores "delta-miu" se basan en tubos al vacío. De hecho, un tubo al vacío repolarizado se convierte en el mecanismo por el cual el compresor sabe cuánto y cuándo reducir la ganancia.

A medida que aumenta la señal que alimenta a estos compresores, la corriente real enviada a la rejilla de su tubo disminuye, lo que culmina en una reducción del nivel general. En otras palabras, el tubo es el motor principal que impulsa la reducción de ganancia.

Lo que importa es el caso de uso: el sonido de la cosa. Las palabras para describir este tipo de compresión a menudo incluyen "suave", "espeso" y "cremoso". Se sabe que estos compresores manejan cantidades generosas de reducción de ganancia antes de que se acumulen picos no deseados.^{26 27}

²⁶ Tipos de compresión. [Consultado el 14 junio de 2022]. Disponible en:

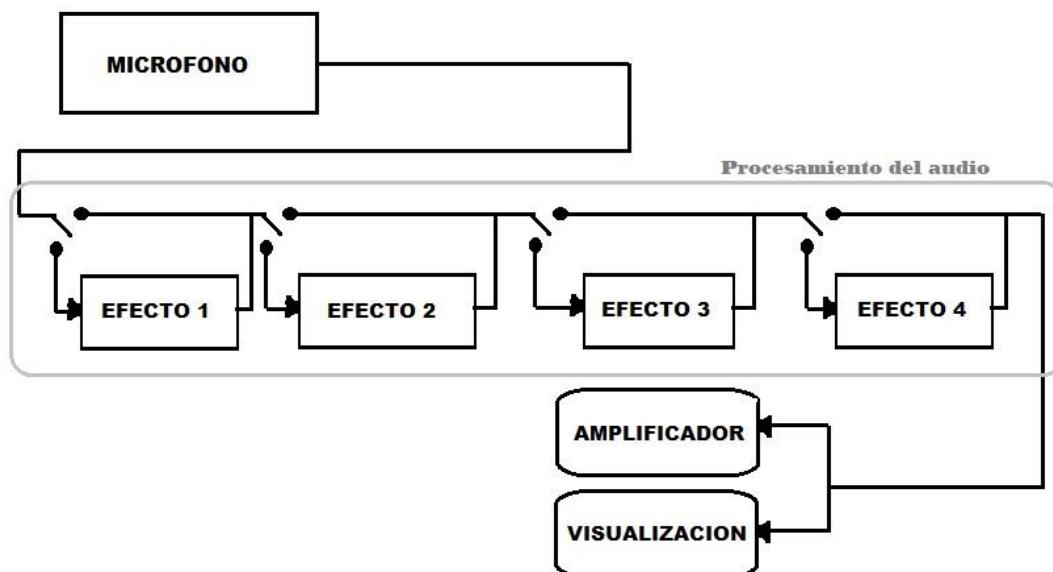
https://musictechstudent.co.uk/music_technology_/history-and-development-of-compression/

²⁷ compresión $\Delta-\mu$. [Consultado el 17 junio de 2022]. Disponible en: <https://www.ageofaudio.com/en/brief-history-of-dynamics-processors/>.

5. DESARROLLO DE LA SOLUCION

En este capítulo se presenta la metodología utilizada para el desarrollo de este proyecto. El esquema propuesto consta de cuatro (4) fases: adquisición de las señales de audio por medio del micrófono y caracterización, (2) Diseño y simulación de cada uno de los pedales, (3) implementación del hardware (circuito) de cada pedal y (4) Amplificación de la señal producida. En la parte final del libro se incluye el diseño de una interfaz gráfica como herramienta para la visualización de las señales producidas por cada efecto. Ver Figura 10.

Figura 10. Esquema del proyecto



Fuente: autor

5.1 ADQUISICIÓN DE LA SEÑAL DE AUDIO Y CARACTERIZACIÓN

Esta fase del proceso es importante porque en esencia el micrófono que adquiere la señal es en sí mismo un filtro que condiciona la señal.

ADQUISICIÓN DE LA SEÑAL.

Para la realización de este proyecto fue necesario adquirir un micrófono profesional SH – 955 NFX que utiliza una batería tipo CR-2032 (+3V) con salida de un Jack de audio de $\frac{1}{4}$ ", control de volumen y tono que ofrece una fácil montura sin modificaciones dramáticas del instrumento. Este es un micrófono de contacto de bajo consumo cuyas dimensiones son 6.7 cm x 3.8 cm x 3 cm. Está diseñado para reproducir las vibraciones del instrumento auténticamente con cada movimiento del arco en todas las posiciones. Este micrófono de contacto va ensamblado en la parte

baja de las cuerdas, específicamente entre el tira-cuerdas (o cordal) y el puente, y además posee dos lengüetas de presión (nano Flex pickups gemelos) que van insertadas en el puente para mejorar la relación señal a ruido adquirida. Cada uno de este par de lengüetas nano Flex capta la señal de audio con ruido y este ruido es suprimido a la manera del modo en rechazo común (CMRR) de los amplificadores diferenciales²⁸.

5.2 DISEÑO

En este apartado se presentan los diseños, los cálculos y los respaldos con simulaciones para construir el circuito de cada uno de los cuatro efectos.

Buena parte de los valores teóricos se basan en una estimación de valores promedio que son afectados por: la tolerancia propia de cada elemento, la calidad del lote de semiconductores/integrados así como la casa fabricante, el asumir un modelo simplificado con respecto al comportamiento de determinados elementos (como amplificadores operacionales o capacitores entre otros), la precisión de los instrumentos de medición, así como la elección y ejecución propia de un determinado método de desarrollo.

5.2.1 Pedal de efecto Distorsión.

Figura 11. Esquema de bloques del efecto distorsión



Fuente: autor

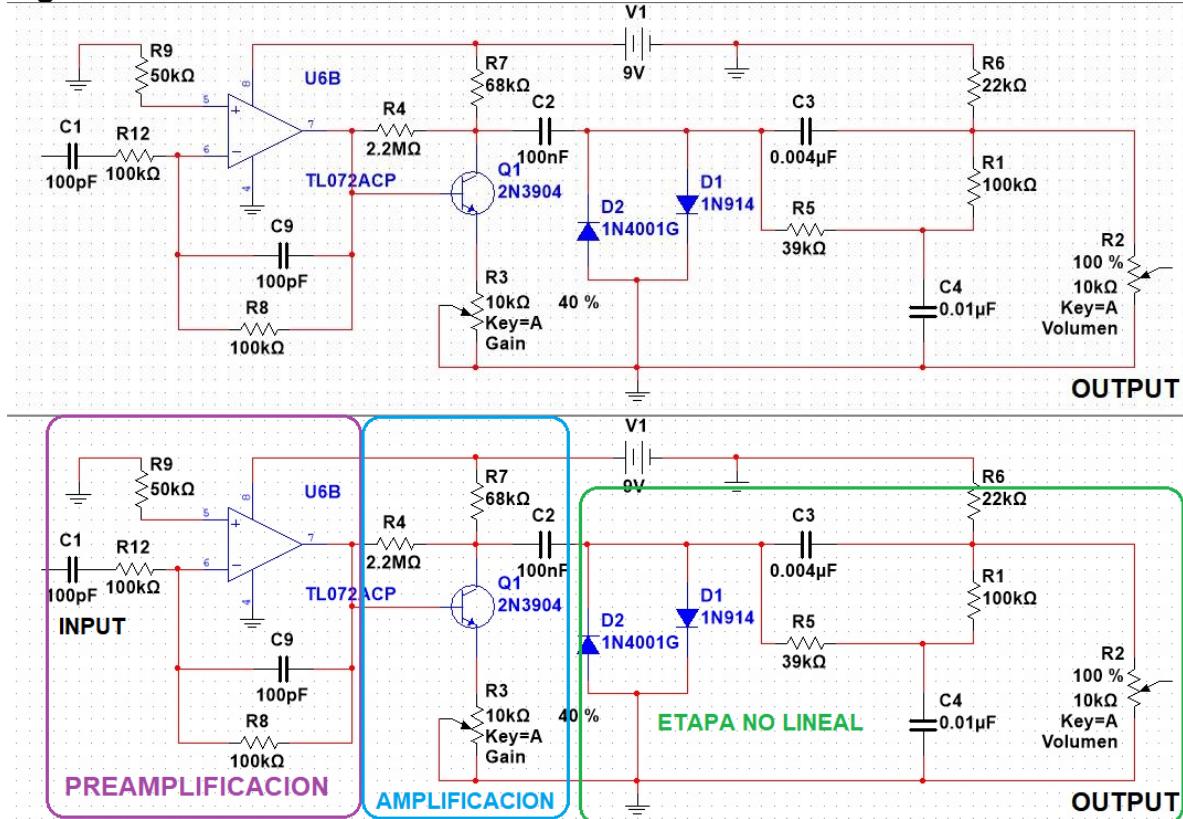
Para diseñar este efecto (*Figura 11*) se parte de la clásica polarización del transistor BJT como amplificador en polarización de emisor común²⁹ realimentando con una pre amplificación y adecuación con amplificador TL072, unida a la salida con un par de diodos paralelos contrapuestos aterrizados³⁰. Este permitirá manipular la ganancia y el volumen del efecto mediante potenciómetros estratégicamente colocados, de acuerdo a la literatura. El diseño final se muestra en la Figura 12.

²⁸ micrófono Sh-955. [Consultado el 27 de abril de 2022]. Disponible en: <https://shadowelectronics.com/products/sh-955>.

²⁹ amplificador. [Consultado el 25 de mayo de 2022]. Disponible en: https://www.electronics-tutorials.ws/amplifier/amp_4.html. Consultado en mayo de 2020.

³⁰ Pedalera eléctrica para guitarra. [Consultado el 1 de diciembre de 2022]. Disponible en: https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/88833/victor.castano_110677.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Figura 12. Circuito del efecto distorsión



Fuente: autor

Se calcula el capacitor de acople de bajas frecuencias en el buffer de entrada de preamplificación conformado por el capacitor C1 y la resistencia R12.

Dado que la frecuencia más baja del violonchello será la nota de Do, la cual tiene una frecuencia de 64.5 Hz (se toma 60 Hz como margen de tolerancia) entonces se fija un valor de capacitancia de 0.01 µF y se calcula el valor de R12:

$$R_{12} = \frac{1}{2\pi C_1 * f_c} = \frac{1}{2\pi(0.00000001F)(60 \text{ Hz})} = 265258.24 \Omega \approx 265 \text{ K} \quad (\text{Ecuación 2})$$

El otro filtro en este buffer corresponde a la resistencia R8 y a la capacitancia C9 - que se encuentran en el lazo de realimentación-, quienes configuran un filtro pasa bajos que hará el papel de suavizar y aplanar mejor los sobre picos de la señal de audio, cortando así cualquier armónico agudo desagradable que se pueda presentar accidentalmente y que llegara a sobrepasar los 0 dB de ganancia (como en el momento de desconectar el Jack del micrófono, amplificador o del mismo pedal).

Como la frecuencia máxima promedio para un sonido generado por violonchello está en aproximadamente 7 KHz³¹, se elige una frecuencia de corte de 9 KHz, por lo tanto, se calcula la capacitancia C9:

$$C9 = \frac{1}{2\pi R8 * f_{c3}} = \frac{1}{2\pi(265000\Omega)(9000 \text{ Hz})} = 66.73 \text{ pF} \approx 47 \text{ pF} \text{ v. comercial} \quad (\text{Ecuación 3})$$

Como se requiere que la ganancia sea de 1 entonces se debe hacer de R8 el mismo valor de R12, o sea R8 = 265 KΩ. Como 265KΩ no existe comercialmente se deja en R12 = R8 = 270KΩ.

Ahora se procede al análisis y diseño de la etapa del BJT en emisor común realimentado, sabiendo que su ganancia de voltaje es $Av \approx -R_C/R_E$.

Entonces se diseña para una ganancia máxima de 3 (se pretende no sobrecargar y saturar mucho la salida), por lo que se asume la resistencia del emisor como 20KΩ y la resistencia de colector se calcula como $R_C = Av * R_E = 3 * 20\text{K}\Omega = 60\text{K}\Omega$. El valor comercial más cercano es 68KΩ.

Para poder controlar la ganancia de este amplificador, se deja la resistencia de emisor como un potenciómetro de 22KΩ.

Después de esto la señal pasa por un circuito tanque compuesto por C3, C4, R1 y R5, el cual ayudará a la resonancia y la eliminación de armónicos molestos. El capacitor C4 contribuye a suavizar el rizo del recorte producido por los diodos.

Este circuito tanque tiene frecuencias de corte:

$$f_c = \frac{1}{2\pi R5 * C4} = \frac{1}{2\pi * 39000 * 0.000000001} \approx 408 \text{ Hz} \quad (\text{Ecuación 4})$$

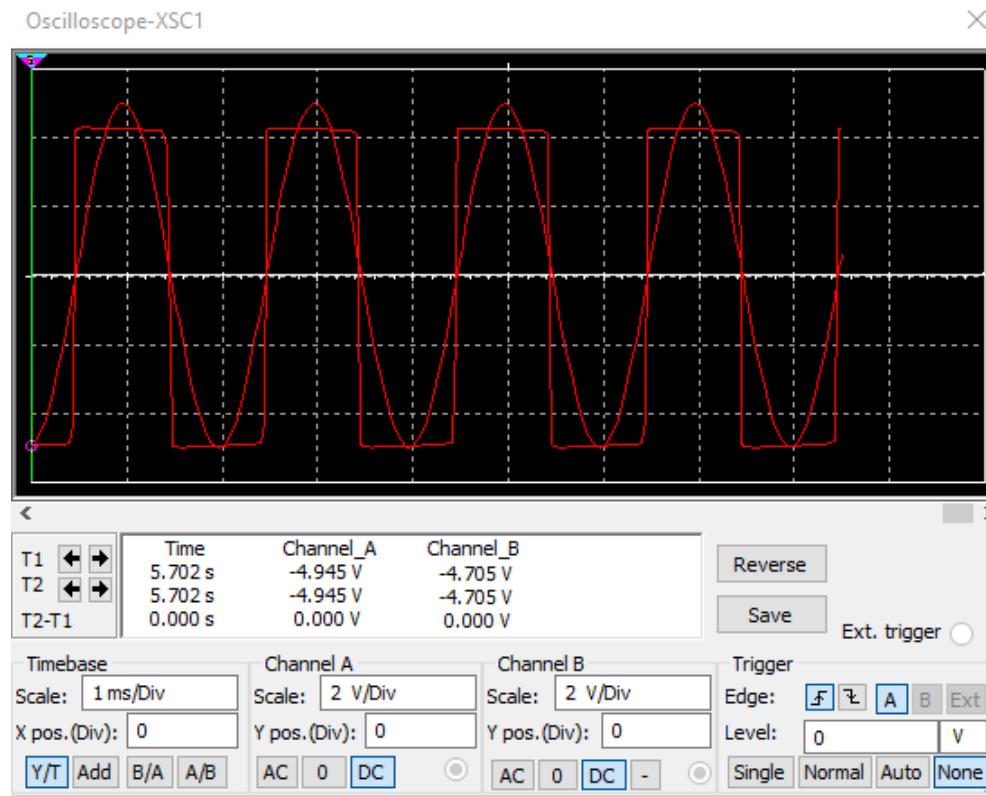
$$f_c = \frac{1}{2\pi R6 * C3} = \frac{1}{2\pi * 22000 * 0.000004F} \approx 1808 \text{ Hz} \quad (\text{Ecuación 5})$$

Finalmente atraviesa un potenciómetro de 33KΩ que controla el volumen final de la señal de audio de salida.

Los recortes y la señal de salida se muestran a continuación en las simulaciones con Multisim®, para tres niveles de ganancia y volumen:

³¹ Espectro de violonchelo. [Consultado el 27 de abril de 2022]. Disponible en: <https://www.mozartproject.org/how-much-hertz-does-the-cello-gives/>.

Figura 13. Simulación de salida vs entrada efecto distorsión con volumen 100% ganancia 100%



Fuente: autor

En la Figura 13 se puede apreciar una salida recortada debido a la saturación de los semiconductores. Progresivamente el recorte se va haciendo más apreciable conforme el nivel de ganancia y volumen aumentan. Esta relación queda resumida en la Tabla 1.

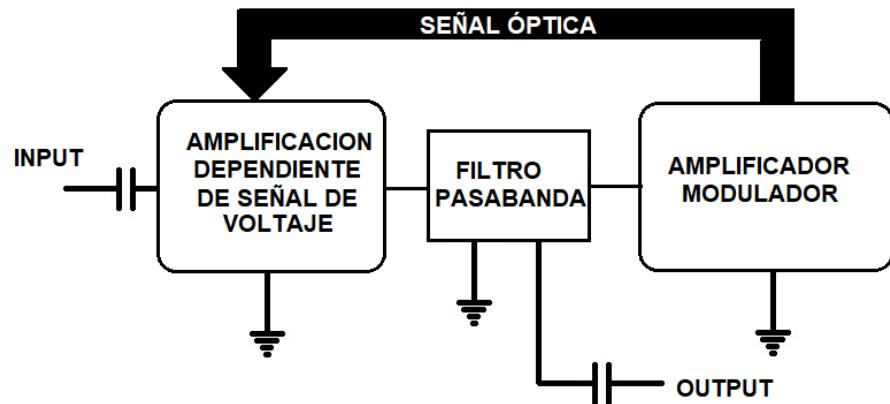
Tabla 1. Relación Volumen-Ganancia-Salida efecto distorsión.

In	Gain	Volumen	Out
3 mV	5	50	1.1 V
3 mV	50	80	1.45 V
3 mV	50	100	1.75 V
3 mV	100	100	1.9 V

5.2.2 Pedal de efecto Compresor.

Este circuito se puede dividir en tres partes o módulos generales (*Figura 14*):

Figura 14. Etapas del efecto compresor.



Fuente: autor

Para este efecto se recurre a un modelo básico construido a partir de dos amplificadores operacionales (TL072) en cascada, haciendo uno la función de una fuente controlada por voltaje, y el otro siendo el disparador que controla dicha fuente de voltaje de acuerdo a la estructura propuesta en la literatura³² (*Figura 15*).

La forma en cómo se va a afectar la fuente dependiente del voltaje será a partir del cambio de una de sus resistencias de polarización del amplificador que actúa como fuente dependiente de voltaje. Esta resistencia variable corresponde a una fotorresistencia LDR de $1M\Omega$ acoplada a un diodo que está a la salida del otro amplificador.

5.2.2.1 Etapa de amplificación dependiente de voltaje.

Esta etapa es diseñada con un amplificador operacional configurado como un amplificador de ganancia clásica con la foto-resistencia en el lazo de realimentación. Esta foto resistencia modificará la ganancia del amplificador según la relación:

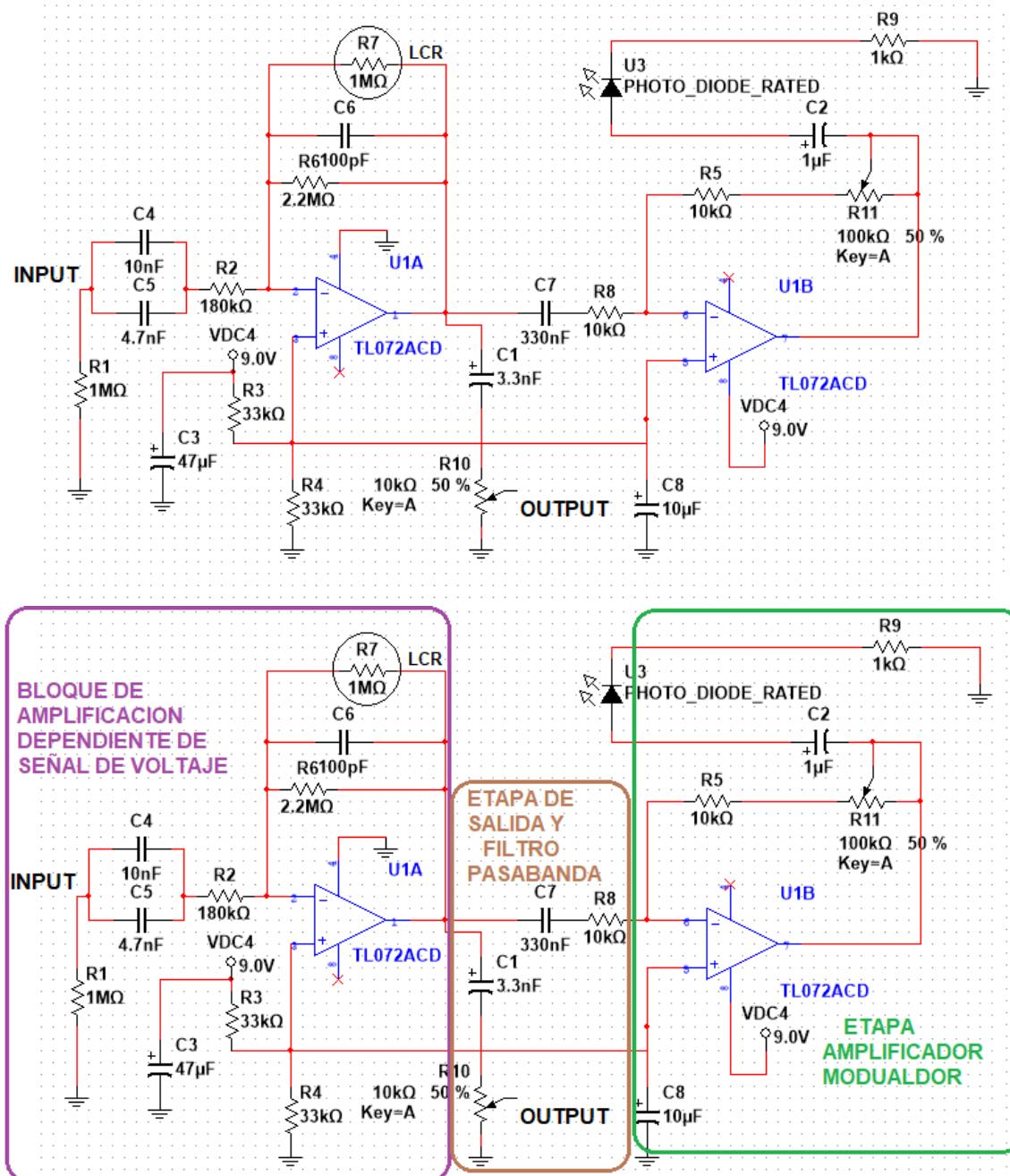
$$Av = \frac{R7//R6}{R2} \quad (\text{Ecuación 6})$$

En donde la resistencia R7 es la fotorresistencia.

³² Nuts and Volts everythings for electronics [Consultado el 1 de diciembre de 2022]. Disponible en: <https://www.nutsvolts.com/tech-forum/question/audio-leveler>.

Se calcula las capacitancias de acople y desacople para un ancho de banda de 60 Hz hasta los 9Khz.

Figura 15. Circuito eléctrico del efecto compresor.



Fuente: autor

Se calcula el capacitor de acople de bajas frecuencias en el buffer de entrada de preamplificación conformado por el paralelo de capacitancias C4 y C5 y la resistencia R2.

Dado que la frecuencia más baja del violonchello será la nota de Do la cual tiene una frecuencia de 64.5 Hz (se toma 60 Hz como margen de tolerancia) entonces se fija un valor de capacitancia en paralelo de 14.7 nF y se obtiene el valor de R2:

$$R12 = \frac{1}{2\pi C1 * f_c} = \frac{1}{2\pi(0.0000000147F)(60 \text{ Hz})} = 180447.78 \Omega \approx 180 K\Omega \quad (\text{Ecuación 7})$$

El otro filtro en este buffer corresponde a la resistencia R7, R6 y a la capacitancia C6 -que se encuentran en el lazo de realimentación-, quienes configuran un filtro pasa bajos que hará el papel de suavizar y aplanar mejor los sobre picos de la señal de audio, cortando así cualquier armónico agudo desagradable que se pueda presentar accidentalmente y que llegara a sobrepasar los 3 dB de ganancia (como en el momento de desconectar el Jack del micrófono, amplificador o del mismo pedal). Como la frecuencia máxima promedio para un sonido generado por violonchello está en aproximadamente 7 KHz³³ se elige una frecuencia de corte de 9 KHz, por lo tanto, se obtiene la capacitancia C6:

$$C6 = \frac{1}{2\pi R8 * f_{c3}} = \frac{1}{2\pi(180000\Omega)(9000 \text{ Hz})} = 98 \text{ pF} \approx 100 \text{ pF} \text{ v. comercial} \quad (\text{Ecuación 8})$$

Como se requiere que la ganancia sea de mínimo 1 entonces se debe hacer de R6 aproximadamente de un valor cercano a la fotorresistencia para mantener estable el cambio en su valor. Es decir, $R6 = 2.2M\Omega$.

5.2.2.2 Etapa del filtro pasabanda.

La señal pasa a través de un filtro pasabanda compuesto por R8, C6, C7 y el potenciómetro R10.

Este filtro se encargará de suavizar la señal y además eliminar los picos de frecuencias muy altas y muy bajas, dejándolo listo para el ingreso al amplificador operacional que va a producir el disparo. Este lazo de filtro pasabanda también va conectado a la salida del audio mediante un potenciómetro que controlará el volumen de la señal. De acuerdo a las características que se desea de disparo, como una buena diferenciación entre los agudos y los graves o el manejo de frecuencias medias (1.5 – 4 KHz), se calcula el filtro pasabanda.

³³Espectro de violonchelo. [Consultado el 27 de abril de 2022]. Disponible en: <https://www.mozartproject.org/how-much-hertz-does-the-cello-gives/>.

$$C7 = \frac{1}{2\pi R8 * f_{c1}} = \frac{1}{2\pi (10000\Omega) (0.0000003F)} = 303.13 \text{ nF} \simeq 330 \text{ nF v.c.} \quad (\text{Ecuación 9})$$

$$C1 = \frac{1}{2\pi R10 * f_{c2}} = \frac{1}{2\pi (100000\Omega) (0.000001F)} = 3.18 \text{ nF} \simeq 3.3 \text{ nF v.c.} \quad (\text{Ecuación 10})$$

Este filtro es importante para limpiar y adecuar apropiadamente la señal que activará los disparos de luz del LED hacia la fotorresistencia.

5.2.2.3 Etapa de modulación.

Finalmente, en esta etapa el segundo amplificador operacional tendrá una ganancia variable, debido al potenciómetro en serie con la resistencia R5, y este potenciómetro precisamente será el control del umbral (*threshold*) del efecto compresor, debido a la formula:

$$Av = \frac{(R11+R5)}{R8} \quad (\text{Ecuación 11})$$

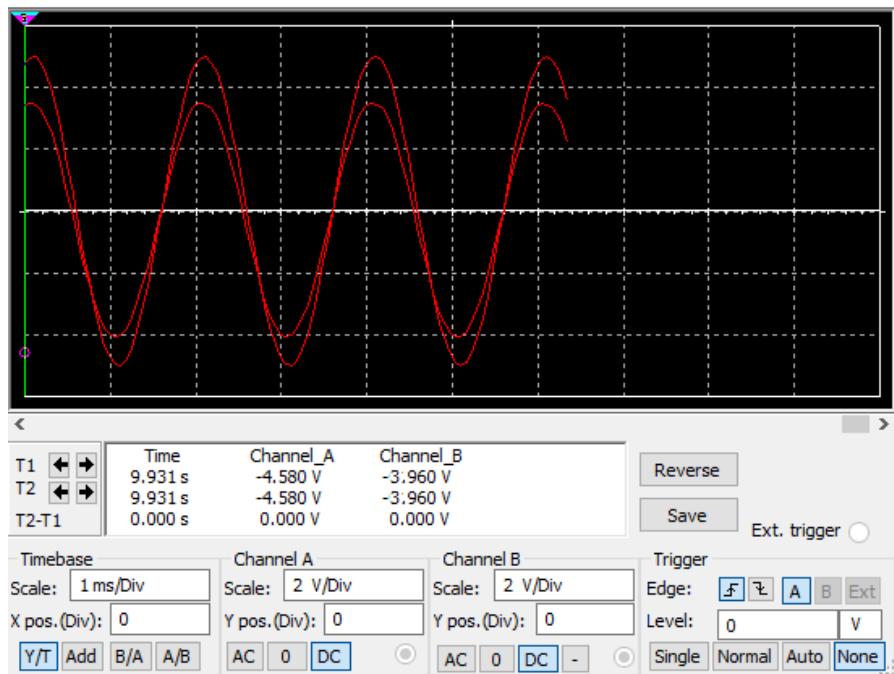
Se requiere una máxima ganancia de 10 u 11. La resistencia R11 es un potenciómetro, por lo tanto, se deja en serie con una resistencia del mismo valor de R8 (para cuando el valor del potenciómetro sea mínimo, la ganancia no sea menor de 1) y dicho potenciómetro será de 100kΩ para una ganancia máxima de 11, de tal forma que $110\text{k}\Omega/10\text{k}\Omega = 11$.

En este punto la señal atraviesa un capacitor C2 y llega a los LEDs para estimular mediante señales ópticas a la fotorresistencia del primer amplificador, cambiando así la ganancia del primer amplificador y generando una modulación entre la señal de entrada y la señal procesada y arreglada del segundo amplificador.

Este efecto modulativo es el que empaqueta la señal de audio original dentro de una envolvente ajustada a un rango máximo y mínimo (el umbral). Es decir, el circuito comenzará a comprimir la señal una vez el pico de la onda sobrepase un cierto valor de umbral (por debajo y por encima) programado por el usuario (ver *Figura 16*).

La señal de audio de salida una vez ha salido del primer amplificador prosigue su salida a través del filtro pasabanda y finalmente sale del circuito hacia el amplificador de audio.

Figura 16. Simulación de salida vs entrada del compresor. Frecuencia = 500Hz, umbral al 50% y amplitud de entrada=5V



Fuente: autor

5.2.3 Pedal de efecto Delay.

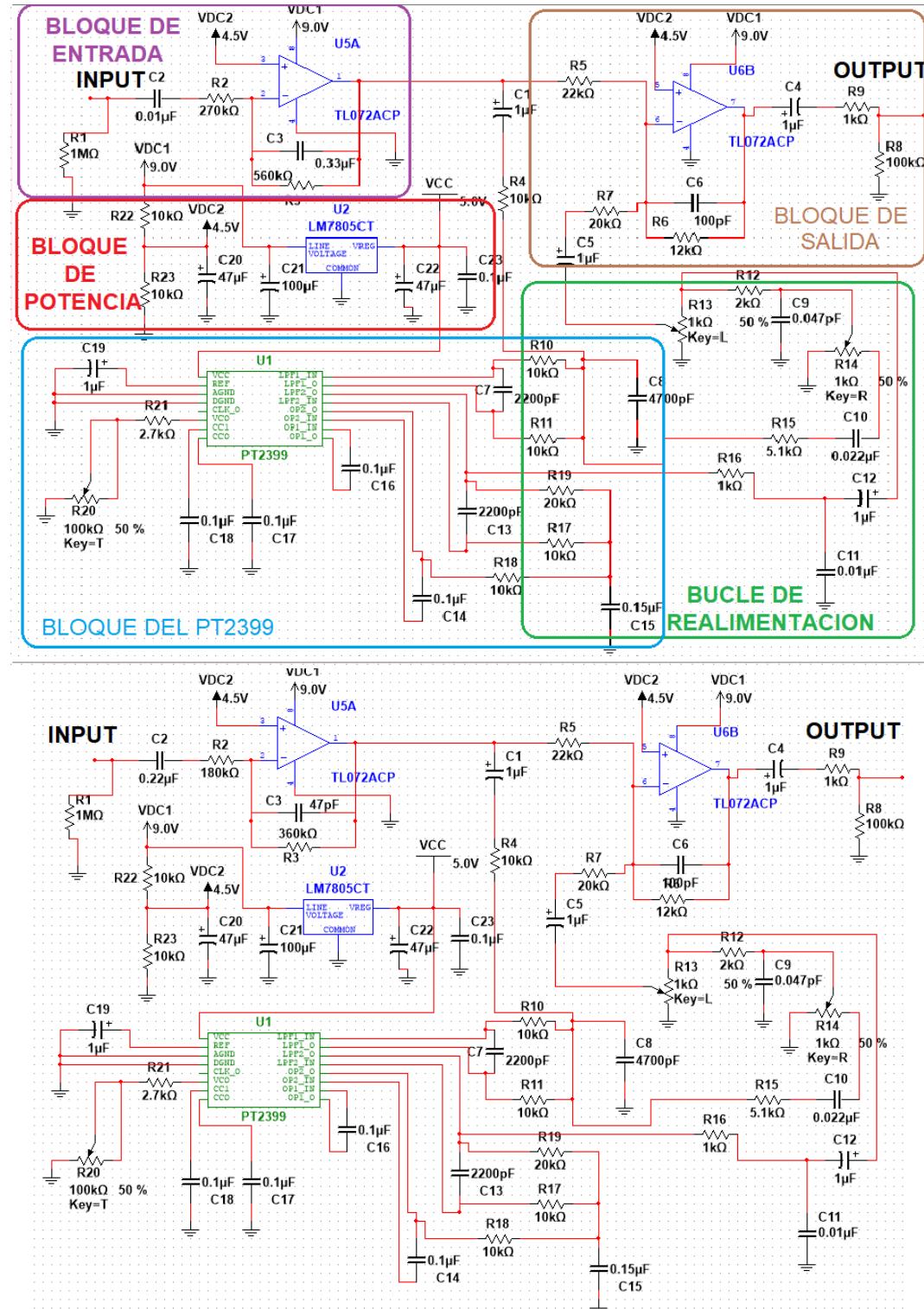
Para este pedal partimos de la configuración básica propuesta por el fabricante según el *datasheet* del circuito integrado PT2399³⁴. Este pedal se puede dividir en cuatro grandes bloques para simplificar el análisis: bloque de entrada y ganancia, bloque de potencia, bloque del integrado PT2399 y bloque de salida como se muestra en la Figura 17.

5.2.3.1 Bloque de potencia.

El bloque de suministro de potencia provee de energía eléctrica a todo el circuito y, según el *datasheet* del integrado, posee un bajo consumo de potencia estimado en una corriente promedio de alrededor de 7.5 a 8 mA corresponde a un LM7805 manteniendo un voltaje fijo de 5V con una entrada de 9V de la batería o de la fuente.

³⁴Datasheet PT2399 Princeton Technology Corp. [Consultado el 2 de mayo de 2022]. Disponible en: <https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/35152/PTC/PT2399.html>

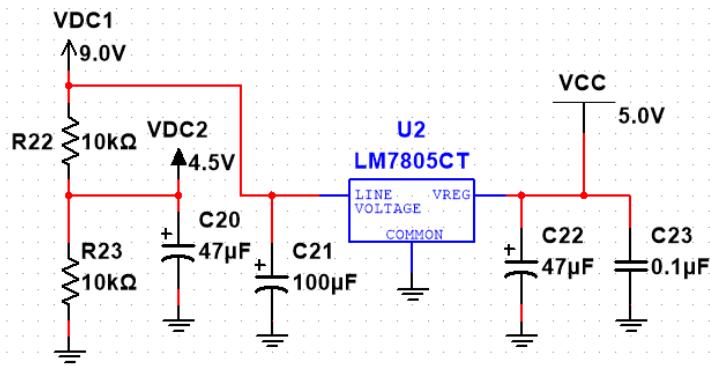
Figura 17. Circuito del efecto delay



Fuente: autor

Las resistencias gemelas R22 y R23 de 10K cada una actúan como un divisor de voltaje para crear un voltaje virtual de +4.5V. Entre la juntura de ambos resistores se ubica un capacitor electrolítico C20 de gran capacidad (47 μ F) para aterrizar o desacoplar dicha juntura.

Figura 18. Bloque de suministro de potencia



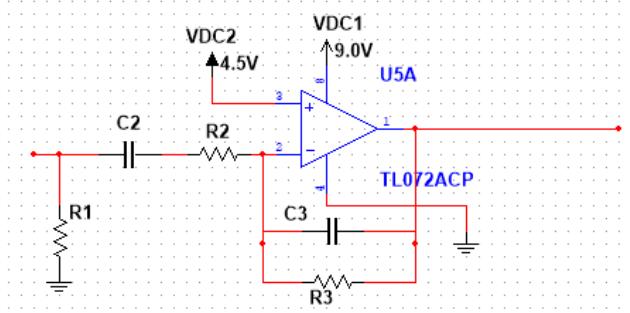
Fuente: autor

El integrado 7805 (*Figura 18*) es un eficiente regulador lineal de 5V, cuyo desempeño mejora con los capacitores C21, C22 y C23. El capacitor C21 actúa manteniendo la ruta de 5V lo más corta posible para rechazar el ruido de la línea de DC. Emparejar el electrolítico C22 con el condensador cerámico C23 ayuda a mejorar la respuesta reguladora, ya que los condensadores electrolíticos son más lentos en respuesta que los condensadores de película y cerámica.

5.2.3.2 Bloque de entrada y ganancia.

El primer bloque hacia donde viajará la señal de audio cuando entra a este efecto será el bloque de entrada y ganancia (*Figura 19*), es decir un buffer que limpia y acondiciona la señal. Como necesitamos dos señales originales para el procesamiento, diseñamos una ganancia de 2 (6 dB) para este buffer.

Figura 18. Bloque de entrada y de ganancia.



Fuente: autor

Este buffer consta de dos filtros: uno pasa altos formado por la resistencia R2 y el capacitor C2. Dado que la frecuencia más baja del violonchello será la nota de Do la cual tiene una frecuencia de 64.5 Hz (se toma 60 Hz como margen de tolerancia) entonces se fija un valor de capacitancia de 0.01 μ F y se calcula el valor de R2:

$$R2 = \frac{1}{2\pi C2 * f_c} = \frac{1}{2\pi(0.00000001F)(60 \text{ Hz})} = 265258.24 \Omega \approx 265 \text{ K } \Omega \quad (\text{Ecuación 12})$$

El otro filtro en este buffer corresponde a la resistencia R3 y a la capacitancia C3 - que se encuentran en el lazo de realimentación-, quienes configuran un filtro pasa bajos que hará el papel de suavizar y aplanar mejor los sobre picos de la señal de audio, cortando así cualquier armónico agudo desagradable que se pueda presentar accidentalmente y que llegara a sobrepasar los 6 dB de ganancia (como en el momento de desconectar el Jack del micrófono, amplificador o del mismo pedal). Como la frecuencia máxima promedio para un sonido generado por violonchello está en aproximadamente 7 KHz³⁵, se elige una frecuencia de corte de 9 KHz, por lo tanto, se calcula la capacitancia C3:

$$C3 = \frac{1}{2\pi R3 * f_{c3}} = \frac{1}{2\pi(540000\Omega)(9000 \text{ Hz})} = 327.5 \text{ nF} \approx 0.33 \mu\text{F} \text{ v. c.} \quad (\text{Ecuación 13})$$

Como se requiere que la ganancia sea de 2, se debe hacer de R3 el doble de R2, o sea R3 = 530 K Ω . Como estos valores de resistencia no son comerciales, se fija en R2 = 270K Ω y R3 = 540K Ω , para una ganancia de Av = 560/270 = 2.07 \approx 2.

Esto se evalúa en la simulación con Multisim, en donde la ganancia de banda media es de 6.009 dB y su 70.7% se halla aproximadamente en 4.2 dB de ganancia, valor que se encuentra en las bandas de 53 Hz y 8.3 KHz que corresponden aproximadamente al ancho de banda diseñado, como se puede observar en la simulación mostrada en la Figura 19.

Finalmente, la impedancia de entrada será:

$$Z_i = R1//R2 = 1M//270K \approx 212.6 \text{ K}\Omega \quad (\text{Ecuación 14})$$

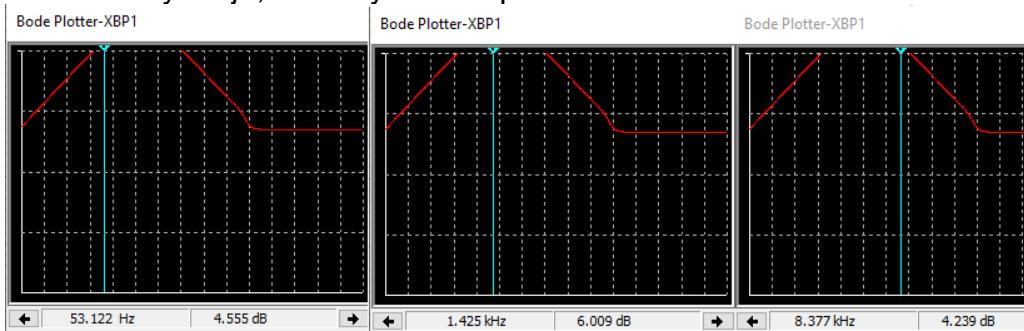
5.2.3.3 Bloque del Integrado PT2399³⁶

La segunda sección, seguido de la etapa de entrada, es la correspondiente a la del dispositivo PT2399. Es precisamente este circuito integrado el que realiza la mayoría del procesamiento de la señal. Un bosquejo puede ser apreciado en la Figura 20.

³⁵ Espectro de violonchelo. [Consultado el 27 de abril de 2022]. Disponible en: <https://www.mozartproject.org/how-much-hertz-does-the-cello-gives/>.

³⁶Datasheet PT2399 Princeton Technology Corp. [Consultado el 2 de mayo de 2022]. Disponible en: <https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/35152/PTC/PT2399.html>

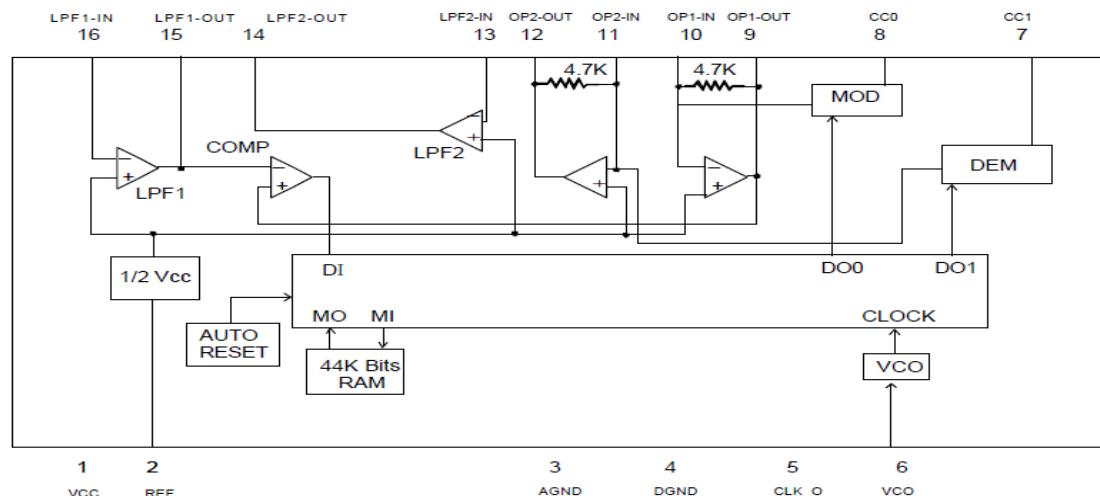
Figura 19. Diagrama de Bode en banda media y en las frecuencias de corte para el efecto delay: baja, media y alta respectivamente. Multisim.



Fuente: autor

Figura 20. Diagrama de bloques interno del PT2399.

BLOCK DIAGRAM



Fuente: Datasheet PT2399 Princeton Technology Corp.

(<https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/35152/PTC/PT2399.html>)

Para abordar el Funcionamiento del CI PT2399 se subdividirá el estudio en cinco subpartes:

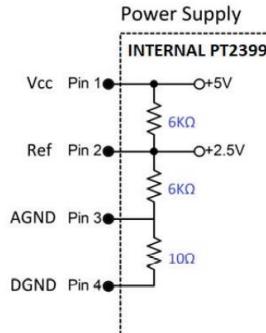
- **Sección de alimentación³⁷.**

En la Figura 21 pin 1 toma el voltaje de salida del regulador 78L05 de la etapa de poder. Este pin está hecho para trabajar con tensiones entre 4.5 y 5.5V.

El pin 2 es un voltaje de referencia creado por un divisor de voltaje interno para crear una conexión a tierra virtual dentro del circuito integrado. Funciona como un *bias* de voltaje (2.5V) para el circuito VCO interno.

³⁷ Datasheet PT2399 Princeton Technology Corp. [Consultado el 2 de mayo de 2022]. Disponible en: <https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/35152/PTC/PT2399.html>

Figura 21. Pines de alimentación del PT2399



Fuente: Datasheet PT2399 Princeton Technology Corp.
<https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/35152/PTC/PT2399.html>)

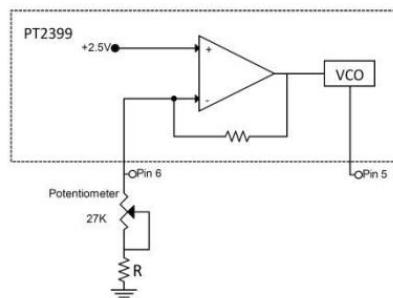
Los pines 3 y 4 actúan como tierras análoga y digital respectivamente, y para la presente configuración ambos van a la misma tierra. A pesar que estén conectadas entre ellas por una resistencia interna de 10Ω , que es la base para el circuito de propagación del retraso.

- **Sección del oscilador controlado por voltaje.**

Los pines 5 y 6 conforman la entrada y la salida del VCO. El pin 5 es la salida de reloj del sistema. La salida de este pin es una onda cuadrada con una frecuencia que es inversamente proporcional y basada en el retraso del tiempo. Esto se puede utilizar como una retroalimentación para medir de manera más precisa el retraso.

Como se ve en la Figura 22, el pin 6 es un pin de ajuste de frecuencia del VCO; el voltaje de este pin siempre es de +2.5V (voltaje de referencia del pin 2) y se utiliza una resistencia variable externa a tierra, lo que cambiará la corriente y dará como resultado una variación del VCO y por lo tanto un cambio en el tiempo de retraso. A continuación, se presenta en la Tabla 2. las relaciones entre la resistencia a tierra del pin 6 y la variación de la frecuencia del reloj interno, el tiempo de retraso y THD (Distorsión Armónica Total).

Figura 22. VCO interno del PT2399



Fuente: Datasheet PT2399 Princeton Technology Corp.
<https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/35152/PTC/PT2399.html>)

Tabla 2. Frecuencia VCO vs tiempo de retardo³⁸

R	27.6K	21.3K	17.2K	14.3K	12.1K	10.5K	9.2K	8.2K
fck	2.0M	2.5M	3.0M	3.5M	4.0M	4.5M	5.0M	5.5M
td	342ms	273ms	228ms	196ms	171ms	151ms	136.6ms	124.1ms
THD	1.0%	0.8%	0.63%	0.53%	0.46%	0.41%	0.36%	0.33%
R	7.2K	6.4K	5.8K	5.4K	4.9K	4.5K	4K	3.4K
fck	6.0M	6.5M	7.0M	7.5M	8.0M	8.5M	9.0M	10M
td	113.7ms	104.3ms	97.1ms	92.2ms	86.3ms	81ms	75.9ms	68.1ms
THD	0.29%	0.27%	0.25%	0.25%	0.23%	0.22%	0.21%	0.19%
R	2.8K	2.4K	2K	1.67K	1.47K	1.28K	1.08K	894
fck	11M	12M	13M	14M	15M	16M	17M	18M
td	61.6ms	56.6ms	52.3ms	48.1ms	45.8ms	43ms	40.6ms	38.5ms
THD	0.18%	0.16%	0.15%	0.15%	0.15%	0.15%	0.14%	0.14%
R	723	519	288	0.5				
fck	19M	20M	21M	22M				
td	36.6ms	34.4ms	32.6ms	31.3ms				
THD	0.14%	0.13%	0.13%	0.13%				

Notes:

1. R = VCO External Resistor (Ω), please refer to PT2399 Application Circuit.

2. fck = VCO Clock Frequency (Hz).

3. td = Delay Time

4. THD = Total Harmonic Distortion

5. We do not recommend the "R" value below 1K Ω when power on.

Fuente: Datasheet PT2399 Princeton Technology Corp.

(<https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/35152/PTC/PT2399.html>)

Para controlar el tiempo de delay el fabricante recomienda aplicar el siguiente criterio escogiendo un potenciómetro de 50K Ω :

$$\begin{aligned} \text{Delay}_{\text{msecs MIN}} &= (0.01146 \cdot (\text{VR1} + \text{R3})) + 29.70 \\ \text{Delay}_{\text{msecs MIN}} &= (0.01146 \cdot 2,700) + 29.70 \\ \text{Delay}_{\text{msecs MIN}} &= 30.942 + 29.70 = 60.642 \text{ ms} \end{aligned} \quad (\text{Ecuación 15})$$

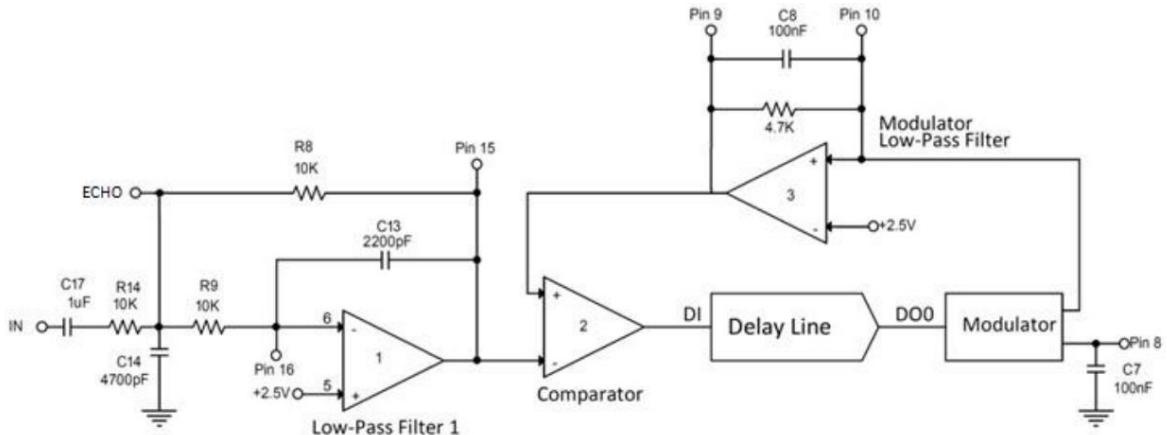
$$\begin{aligned} \text{Delay}_{\text{msecs MAX}} &= (0.01146 \cdot (\text{VR1} + \text{R3})) + 29.70 \\ \text{Delay}_{\text{msecs MAX}} &= (0.01146 \cdot 52,700) + 29.70 \\ \text{Delay}_{\text{msecs MAX}} &= 603.942 + 29.70 = 633.642 \text{ ms} \end{aligned} \quad (\text{Ecuación 16})$$

• Sección de entrada del PT2399.

Esta etapa consta de tres amplificadores operacionales (Figura 23), dos de ellos (2 y 3) hacen parte del ADC Sigma-Delta (conversor análogo-digital); el amplificador operacional restante (1) se configura como filtro de realimentación múltiple (MFB). Este se configura para filtrar la etapa de entrada eliminando el exceso de armónicos altos aceptando una ruta de retroalimentación proveniente del pin ECHO.

³⁸ Datasheet PT2399 Princeton Technology Corp. [Consultado el 2 de mayo de 2022]. Disponible en: <https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/35152/PTC/PT2399.html>

Figura 23. Bloque de entrada del PT2399



Fuente: Datasheet PT2399 Princeton Technology Corp.
<https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/35152/PTC/PT2399.html>)

De acuerdo al método Elliot Sound Products³⁹, se utilizan los siguientes valores para este filtro:

$$R8 = R9 = R14 = 10K\Omega$$

$$C13 = 2.2 \text{ nF}, C14 = 4.7 \text{ nF}$$

Y así la frecuencia de corte será:

$$f_c = \frac{1}{2\pi\sqrt{R8*R9*C13*C14}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{10000*10000*0.000000047*0.000000022}} = 5 \text{ KHz} \quad (\text{Ecuación 17})$$

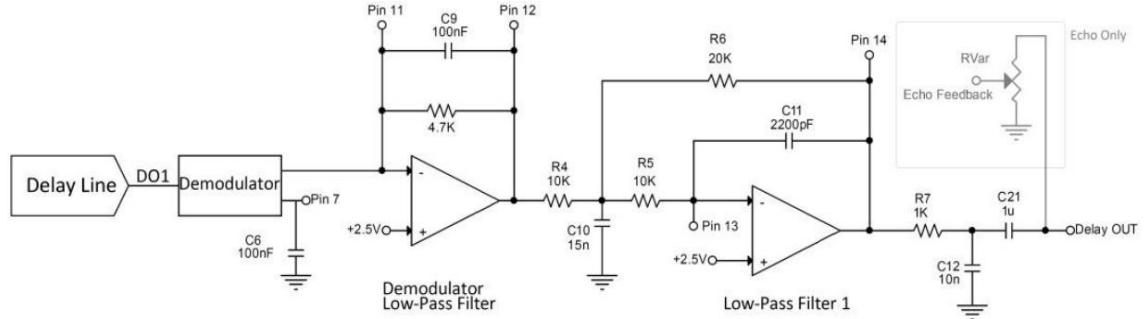
- **Sección de salida del PT2399.**

Esta etapa consta de dos amplificadores operacionales: el primero está configurado como circuito pasa bajos después del demodulador, actuando como filtro anti-aliasing, eliminando armónicos de frecuencias altas y suavizando la señal de salida del demodulador. El segundo amplificador operacional nuevamente se configura como filtro de realimentación múltiple (MFB), el cual suaviza aún más la señal, formando un filtro pasa bajos con $R7=1K\Omega$ y $C12=10nF$. Este segundo filtro tiene una frecuencia de corte:

$$f_c = \frac{1}{2\pi R7 * C12} = \frac{1}{2\pi (1000\Omega) (0.00000001F)} = 15916.4 \text{ Hz} \approx 16 \text{ KHz} \quad (\text{Ecuación 18})$$

³⁹ Elliot Sound. [Consultado el 18 de mayo de 2022]. ["en línea"]. Disponible en: <https://sound-au.com/>

Figura 23. Sección de salida del PT2399



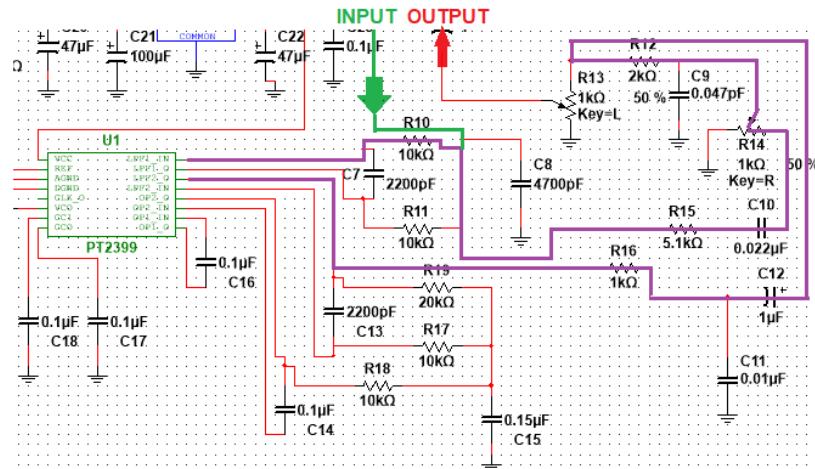
Fuente: Datasheet PT2399 Princeton Technology Corp.
<https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/35152/PTC/PT2399.html>

En la Figura 23 se puede observar que el filtro elevará la impedancia de salida del circuito, esto se soluciona a través de un buffer como etapa de salida. Finalmente, el capacitor C21 eliminará cualquier nivel de corriente continua que vaya hacia la etapa del buffer de salida. Esto se garantiza a través de un capacitor de 10 μF o similar.

- Bucle de realimentación del PT2399.**

La señal que proviene del capacitor C21 se realimentará en el origen con la señal seca (o sin procesar) y se mezclará con la señal proveniente de la salida del buffer (o señal *húmeda*), después se controla a través del potenciómetro que controla las repeticiones (R14) y determina las frecuencias de corte que a su vez determinan el nivel de oscuridad del eco que, actuando en conjunto con el capacitor C9 adecuado eliminará las frecuencias graves haciendo el sonido final parecido a los delay clásicos de cinta.

Figura 24. Lazo de realimentación.

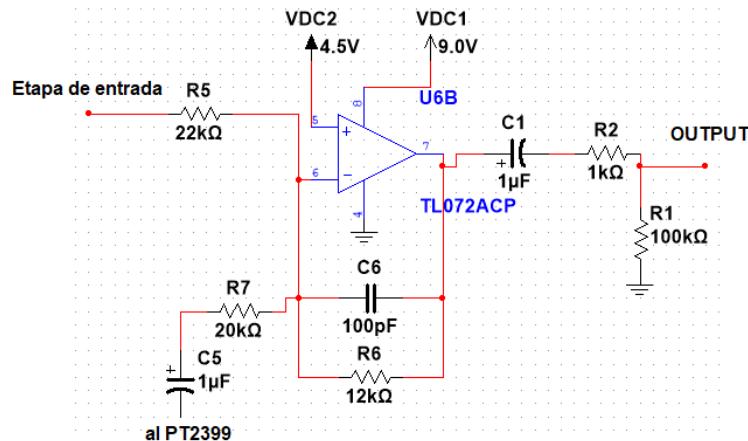


Fuente: autor

5.2.3.4 Bloque de salida.

Finalmente, la última sección en ser atravesada por la señal de audio es la sección del buffer de salida, complementaria a la sección del buffer de entrada como se muestra en la Figura 24. En este sector también se atenúan las magnitudes de las frecuencias altas con respecto a las frecuencias de banda media por medio de dos amplificadores operacionales TL072 duales.

Figura 25. Bloque de salida.



Fuente: autor

En la Figura 25 el filtro toma el audio pre-procesado de sonido no natural y lo convierte de nuevo a su respuesta original. El amplificador operacional se configura en la topología clásica del amplificador de suma. La señal seca que viene sobre R5 tiene un poco más de resistencia que la señal seca que viene sobre R7, lo que hace que la relación de mezcla sea de 1.1: 1 a favor de la señal *húmeda*.

El lazo de realimentación compuesto por C6 y R6 forman un filtro pasa bajo con frecuencia de corte de:

$$f_c = \frac{1}{2\pi R_6 * C_6} = \frac{1}{2\pi (12000\Omega) (0.0000000001F)} \approx 132.63 \text{ KHz} \quad (\text{Ecuación 19})$$

El pequeño capacitor C19 de 100 pF que viene por el lazo de realimentación funciona como un filtro pasa bajos que básicamente suaviza los rizos de la señal, limita el ancho de banda y ayuda a mantener la estabilidad en altas frecuencias.

El capacitor de salida actúa como un filtro pasa altos junto a R17 y R18, por lo tanto, su frecuencia de corte es:

$$f_c = \frac{1}{2\pi R_1 * C_1} = \frac{1}{2\pi (100000\Omega) (0.000001F)} = 1.6 \text{ Hz} \quad (\text{Ecuación 20})$$

Esta frecuencia de corte es un valor suficiente para remover cualquier rastro de baja frecuencia de la señal de salida. Ahora la impedancia de salida se puede calcular como la malla compuesta por R9 y R8 limita la salida de corriente, incluso cuando la salida del Jack este conectada a tierra el amplificador operacional ve una carga de al menos 1K, protegiendo así al amplificador.

El amplificador operacional TL072 tiene una resistencia interna de salida de 1012 Ω , por lo tanto, la impedancia de salida está definida por la formula:

$$Z_{out} = R_1 \parallel (R_2 + Z_{out,TL072})^{40} \quad (\text{Ecuación 21})$$

$Z_{out,TL072}=1012 \Omega$ (datasheet para TL072.) Luego:

$$Z_{out} = 100000 \parallel (1000 + 1012)$$

$$Z_{out} = 100000 \parallel 2012$$

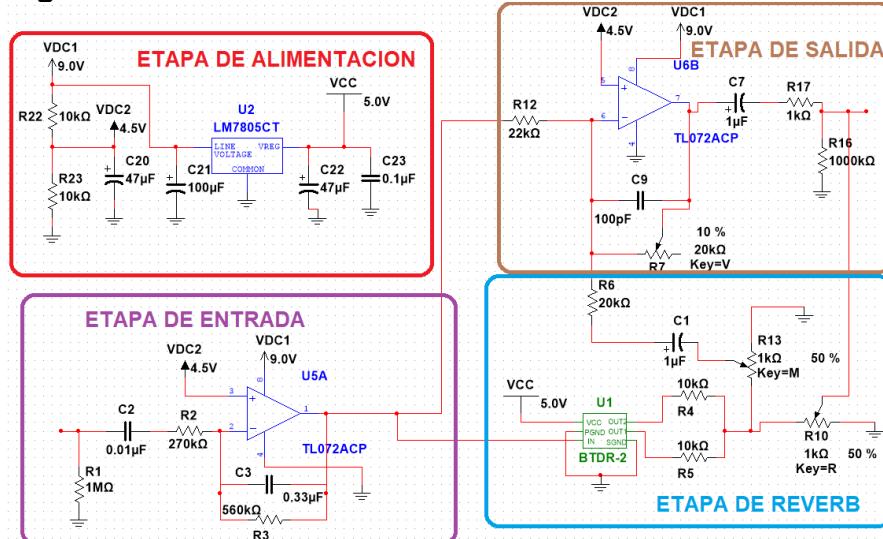
$$Z_{out} = 1973\Omega = 1.973\text{K}\Omega$$

Finalmente, este valor de impedancia de salida será optimo ya que garantiza la fidelidad de la señal de audio debido a que se encuentra en un valor $\leq 10\text{k}\Omega$ sugerido por los fabricantes.

5.2.4 Pedal de efecto Reverb.

Este efecto se puede describir en cuatro etapas fundamentales, la estructura principal de este efecto fue tomada de la estructura propuesta por los fabricantes⁴¹

Figura 26. Circuito de efecto Reverb



Fuente: autor

⁴⁰ Datasheet PT2399 Princeton Technology Corp. [Consultado el 2 de mayo de 2022]. Disponible en: <https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/35152/PTC/PT2399.html>

⁴¹ Belton Engineering Co.LTD. [Consultado el 1 de diciembre de 2022]. Disponible en: <https://pedalpartsandkits.com/content/btdr2.pdf>

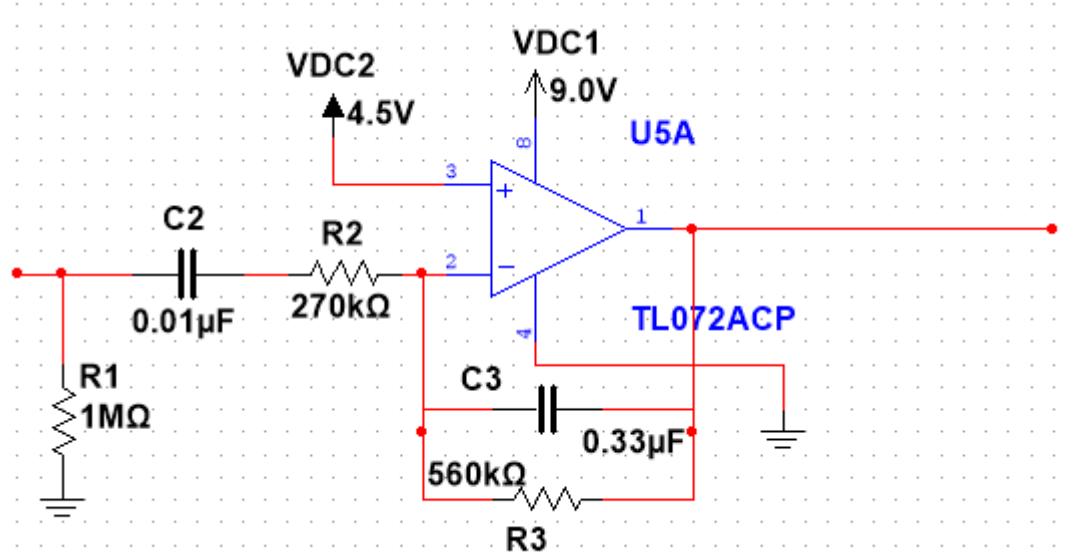
5.2.4.1 Etapa de entrada.

En la Figura 26 el buffer de entrada es simplemente un amplificador operacional reforzando la señal antes de que sea dividida en la señal análoga simple (o sonido ‘seco’) y una señal resultante de la conversión numérica y el tratamiento dado por la pastilla BTDR-2 (o sonido ‘húmedo’ o ‘mojado’). La resistencia de $1M\Omega$ actúa como un *pull-down* que previene los sonidos de estallido cuando se acumula suficiente carga en la entrada del circuito. El exceso de corriente va a tierra cuando el efecto es encendido. Allí hay un capacitor de $0.01 \mu F$ que previene cualquier corriente DC parásita que pudiera entrar. Entonces la señal va hacia el amplificador TL072 a través de un resistor. La pastilla TL072 contiene dos amplificadores operacionales basados en un amplificador JFET de bajo ruido. Este está configurado en realimentación negativa, por lo tanto, su ganancia será:

$$Av = \frac{R3}{R2} = \frac{560}{270} = 2.07 \quad (\text{Ecuación 22})$$

El amplificador operacional multiplica la señal por 2, por lo que cuando se divide entre ambas secciones es como tener dos señales como la original a cada lado del circuito.

Figura 27. Bloque de entrada del efecto *reverb*



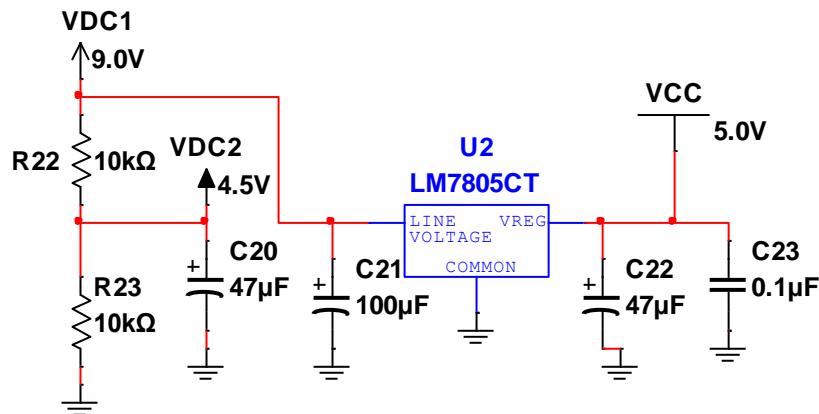
Fuente: autor

Esta etapa (*Figura 27*) es diseñada de la misma forma que el diseño del bloque de entrada del anterior efecto (ver efecto *delay* numeral 5.2.3.2).

5.2.4.2 Etapa de alimentación.

La Figura 28 muestra esta etapa con el regulador 78L05 y sigue los mismos parámetros de diseño que la etapa de alimentación del anterior efecto (ver efecto *delay* sección 5.2.3.1).

Figura 28. Etapa de alimentación del efecto *reverb*



Fuente: autor

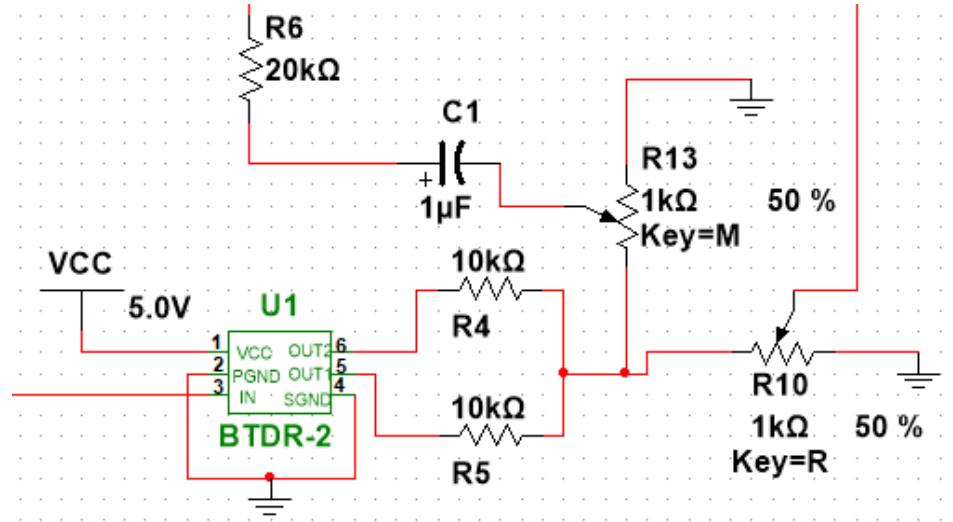
La sección de la fuente de poder estabiliza la corriente y un voltaje regulado de +5V y esto es importante para el amplificador TL072 y sobre todo para el integrado BTDR-2. Un capacitor de 100 μ F elimina todas las posibles oscilaciones residuales del cargador. Al lado izquierdo de la sección de poder existen dos resistencias que actúan como divisores de voltaje. La mitad de la corriente atraviesa el resistor de 10k que va a tierra y la otra mitad va a VDC2. Se obtiene un voltaje 4.5V perfecto para el TL072. A la derecha del circuito esta puesto un regulador 7805 dejando un limpio valor de +5V que será utilizado por los demás circuitos integrados.

5.2.4.3 Etapa de reverb (integrado BTDR-2)⁴²

Este circuito usado es propuesto por los fabricantes de Accutronics ® en las hojas de datos de este integrado.

⁴² Datasheet Accutronic & Belton Sound inc. [Consultado el 7 de mayo de 2022]. Disponible en: (http://www.accutronicsreverb.com/main/?skin=sub01_05_1.html)

Figura 29. Bloque de *reverb* con integrado BTDR-2



Fuente: autor

La sección que trata la señal (*Figura 29*) o sección *húmeda* simplemente es la pastilla BTDR-2. La señal entra por el pin 3 y sale por los pines 5 y 6. Después es mezclada con dos resistores de 10kΩ. La señal saliente es propiamente la señal reverberada. Entonces aquí la señal regresa por el lazo de realimentación del segundo amplificador operacional.

Primero el potenciómetro “M” (Mix) fija qué tanta señal reverberada se realimenta y se mezcla con la señal seca de entrada. En otras palabras, es el usuario quien controla cuanta señal va a estar presente en el sonido final.

Un capacitor acoplador previene de corrientes DC parasitas eventuales y un resistor de 20kΩ fija cuanta señal puede ir al mínimo nivel de mix. Si se coloca un switch en vez de la resistencia de 22kΩ entonces la señal entera sería realimentada y procesada y ya no se tendría señal seca, creando un efecto reverb húmedo puro.

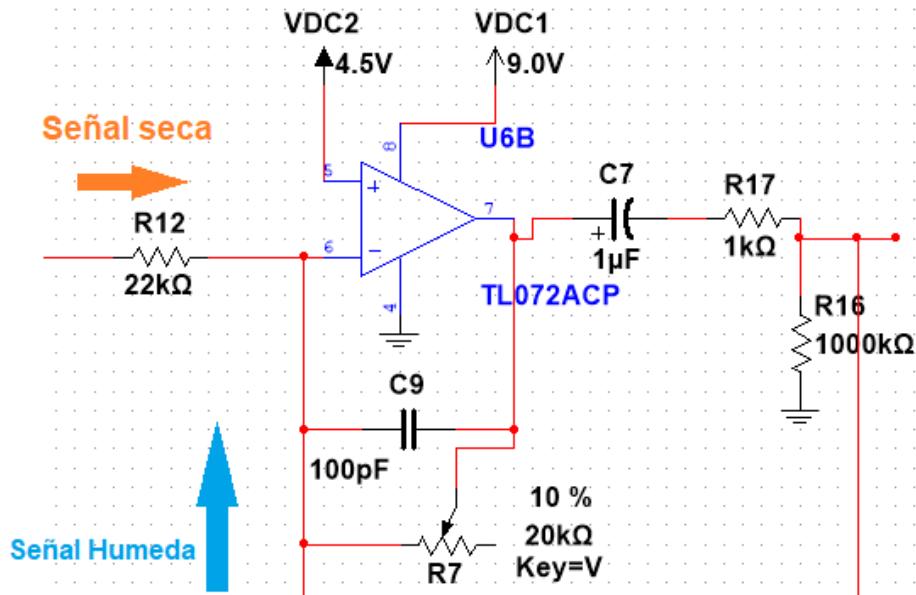
5.2.4.4 Etapa de salida

La etapa de salida (*Figura 30*) también es la sección mezcladora que junta las señales *húmeda* y *seca* usando el segundo amplificador operacional TL072. La ganancia de amplificación se determina a través del potenciómetro (R7) según la relación

$$Av = \frac{R7}{R12} = 0.5 \quad (\text{Ecuación 23})$$

$A=0.5$ se fija para que la señal mezclada tenga la misma amplitud que la señal de entrada y así el volumen permanezca constante dentro de estos valores. Modulando el valor del potenciómetro, el volumen puede ser incrementado o decrementado.

Figura 30. Bloque de Salida (sección mezcladora)



Fuente: autor

Entonces la señal atraviesa un capacitor de acople de $1 \mu F$, y finalmente otra resistencia de *pull-down* antes de salir del circuito.

5.3 IMPLEMENTACION DEL HARDWARE

Luego de obtener el modelo de cada uno de los pedales, se procede a implementarlo. Para esto fue necesario imprimir cuatro PCB's y diseñar las cajas y el empaquetamiento de cada uno de los pedales.

- **Materiales, recursos y equipos.**

La lista de materiales y su cantidad son presentadas en forma de tabla, específicamente en la Tabla 3.

Tabla 3. Lista de materiales, recursos y equipos

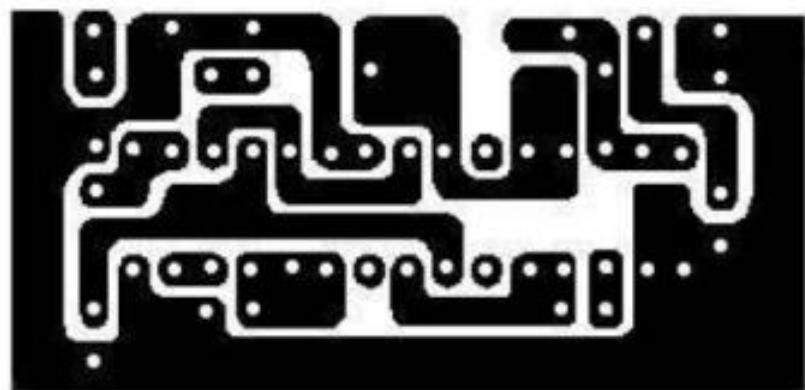
ELEMENTO	CANTIDAD
Resistencia 1 M	2
Resistencia 2.2M	3
Resistencia 180k	2
Resistencia 33k	6

Potenciómetro 10k	2
Amplificador TL072	2
Potenciómetro 100k	2
Resistencia 10k	15
Capacitor 100 pF	3
Capacitor 330 nF	1
Resistencia 1 k	3
Capacitor 1 uF	7
Capacitor 47 uF	4
Fotorresistor LDR 1 M	1
Foto diodo	1
Bateria 9v	4
Capacitor 100 uF	3
Potenciómetro 20k	2
Capacitor 100 nF	9
Capacitor 33 nF	1
Capacitor 470 pF	1
Capacitor 47 nF	1
Resistencia 22 k	3
Amplificador 3554BM	2
LM7805	2
BTDR-2	1
Capacitor 22 nF	2
PT2399	1
Capacitor 10 nF	2
Resistencia 270 k	3
Resistencia 560 k	1
Resistencia 2.7 k	1
Potenciómetro 1k	2
Capacitor 0.33 uF	1
Capacitor 2,2 nF	2
Resistencia 5.1 k	1
Resistencia 100 k	2
Resistencia 20 k	2
Resistencia 12 k	1
Capacitor 150 nF	1
Resistencia 2k	1
Capacitor 0.047 pF	1
Capacitor 4.7 nF	1
Resistencia 150 k	1
LM741	1
Capacitor 47 pF	1
Resistencia 68 k	1

Transistor 2N3905	1
Diodo 1N4001	1
Diodo 1N914	1
Resistencia 39 k	1
Potenciómetro 30k	1
Capacitor 5 nF	1
Cajas modelo 15B para pedales	4
Stomps	4
Tarjeta desarrolladora MyDaQ	1
LED's	4
Jacks ¼" hembra	8
Conectores Jacks ¼"	6
Microfono para chello SD-	1

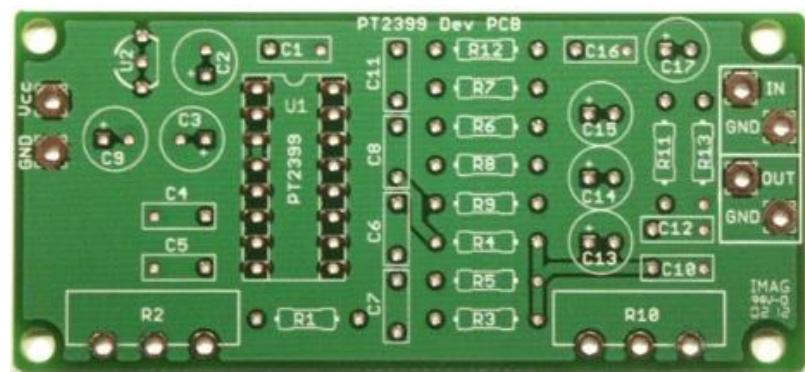
Una vez diseñados los modelos de los circuitos, se mandaron a imprimir en placa PCB. Como se aprecian en las Figuras 31, 32, 33 y 34.

Figura 31. Placa PCB para efecto distorsión



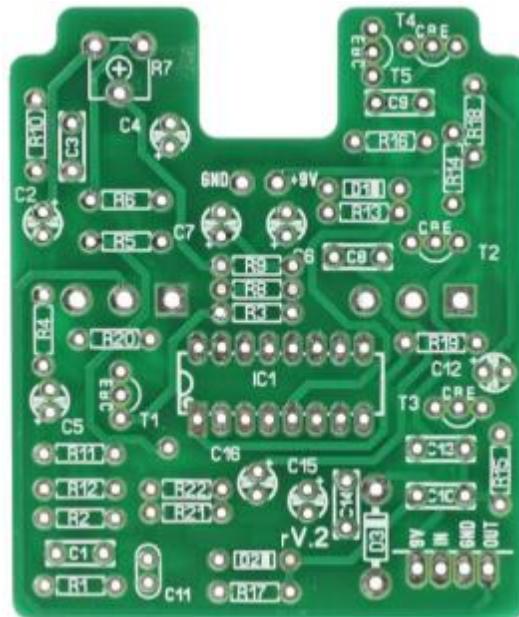
Fuente: autor

Figura 32. Esquema del PCB del efecto delay



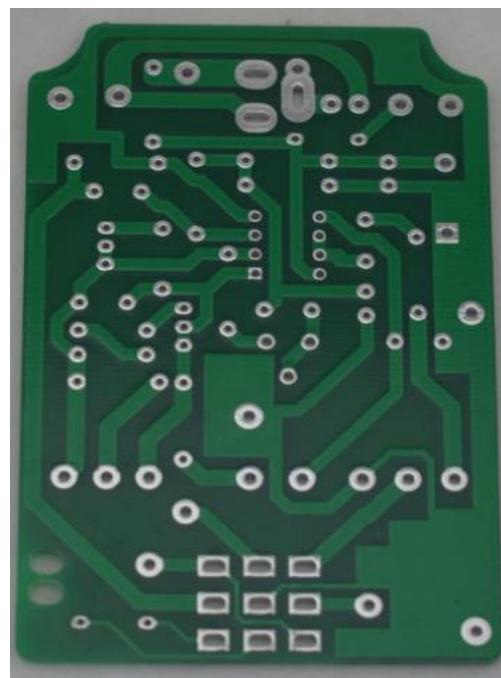
Fuente: autor

Figura 33. Esquema del PCB del efecto compresor



Fuente: autor

Figura 34. Esquema del PCB del efecto reverb

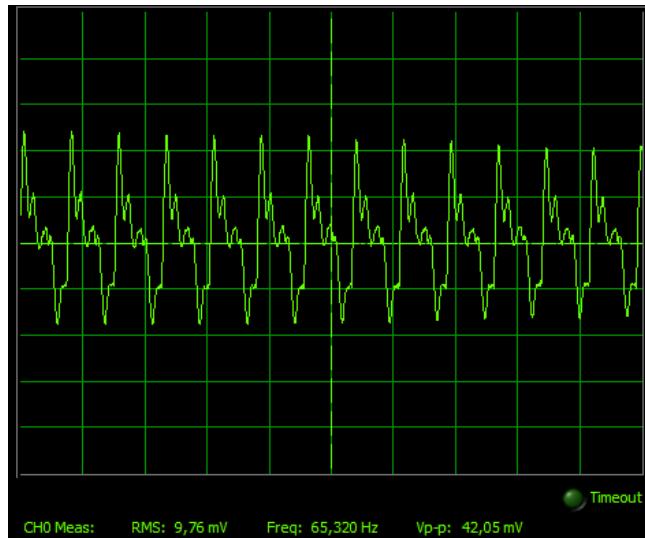


Fuente: autor

6.0 ANÁLISIS DE RESULTADOS

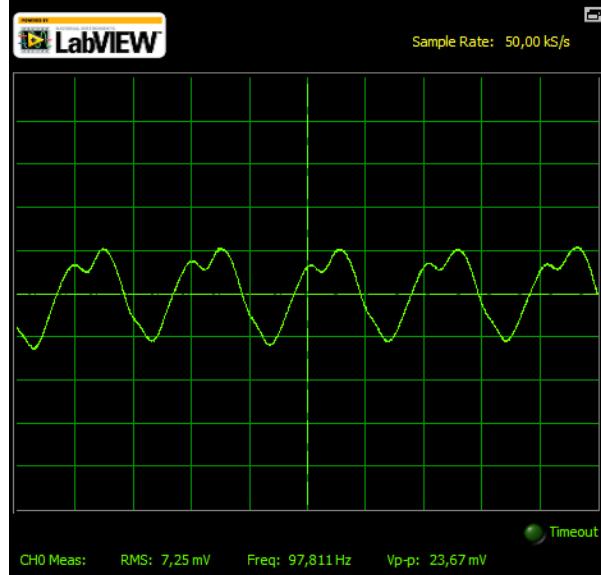
Una vez obtenidos los resultados de las visualizaciones de la señal de salida con la tarjeta MyDAQ y la interfaz gráfica en LabVIEW, se procede al análisis comparando las señales originales del audio sin pedales vs la salida de cada uno de estos y su combinación entre todos:

Figura 35. Detalle de la señal de audio con arco sobre la cuerda más grave: DO 64.5 Hz



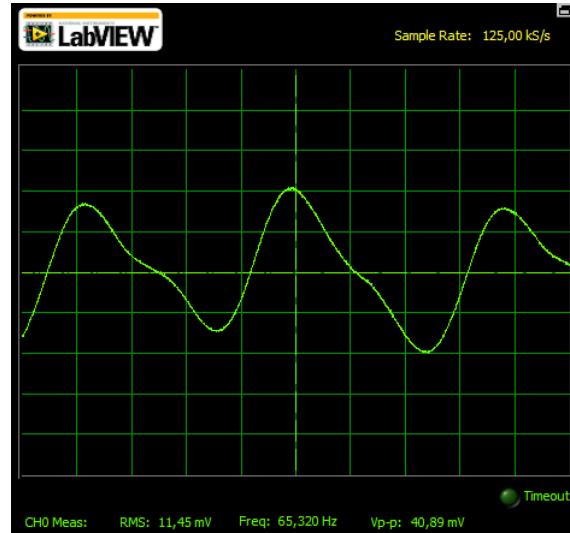
Fuente: autor

Figura 36. Detalle de la señal de audio en pizzicato (pulsada) sobre la SOL: 98 Hz



Fuente: autor

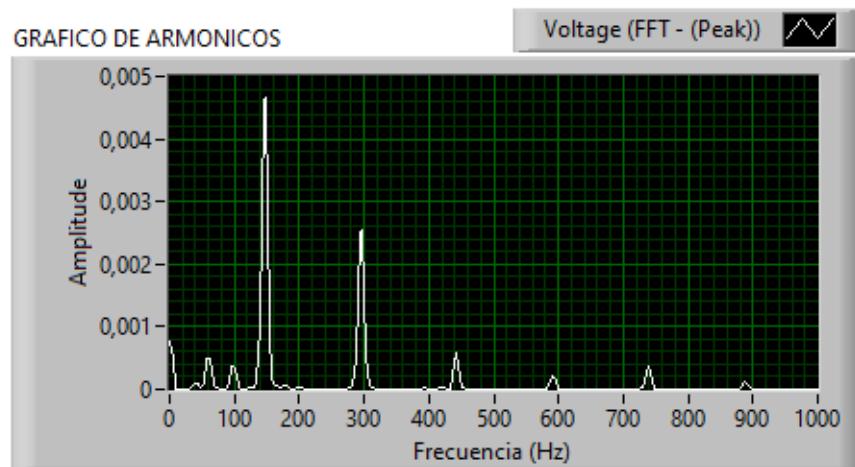
Figura 37. Detalle de la señal de audio en pizzicato (pulsada) sobre la cuerda mas grave: DO 64.5 Hz



Fuente: autor

Se observa en la Figura 37, en comparacion con las Figuras 35 y 36 (las cuales tienen más maximos y minimos relativos en cada ciclo), que la cuerda pulsada tiene menos armonicos involucrados en la señal que cuando se frota con el arco dicha cuerda. Esto sucede porque el frotamiento implica una vibracion constante y mas pareja de la cuerda, mientras que en la pulsación solo se excita una sola vez la cuerda (a la manera de un impulso dirac).

Figura 38. Armonicos sobre la cuerda RE (146.8 Hz)

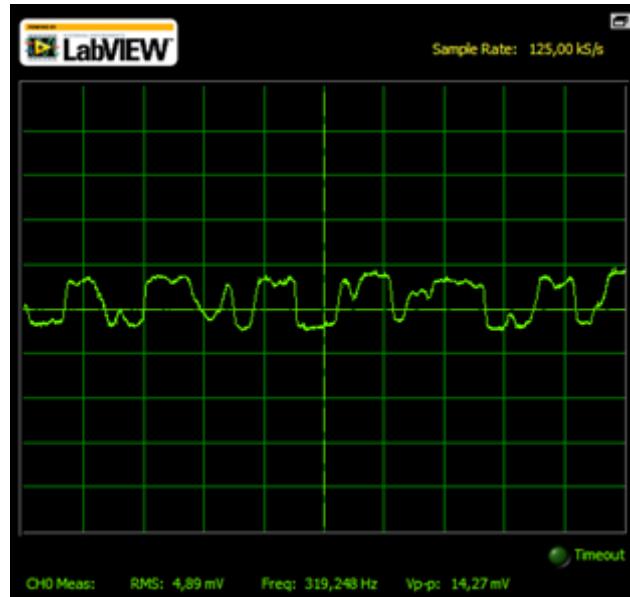


Fuente: autor

Todas las cuerdas del violonchello exhiben un comportamiento parecido, todas están hechas de metal entorchado sobre un alambre de aleación de cobre (a diferencia de otros instrumentos de cuerda que pueden tener cuerdas hechas de nylon). Por esto se muestra que el armónico más fuerte (Figura 38) es el de la propia cuerda que se pulsa, seguido de los otros armonicos mas disminuidos y aminorando su altura conforme aumenta su frecuencia

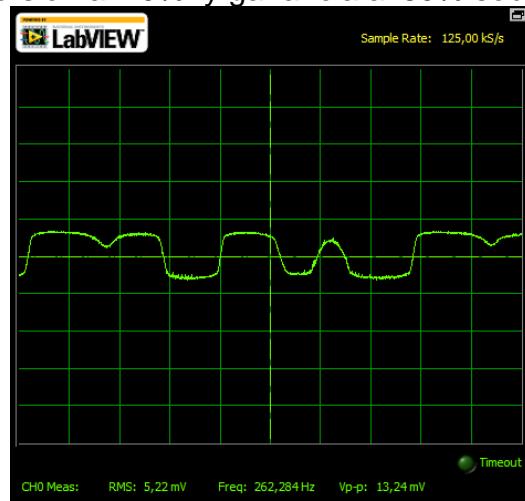
6.1 EFECTO DISTORSIÓN

Figura 39. Efecto distorsión al 70% y ganancia al 80%, frotando con arco sobre la cuerda DO



Fuente: autor

Figura 40. Efecto distorsión al 70% y ganancia al 80% sobre la cuerda DO

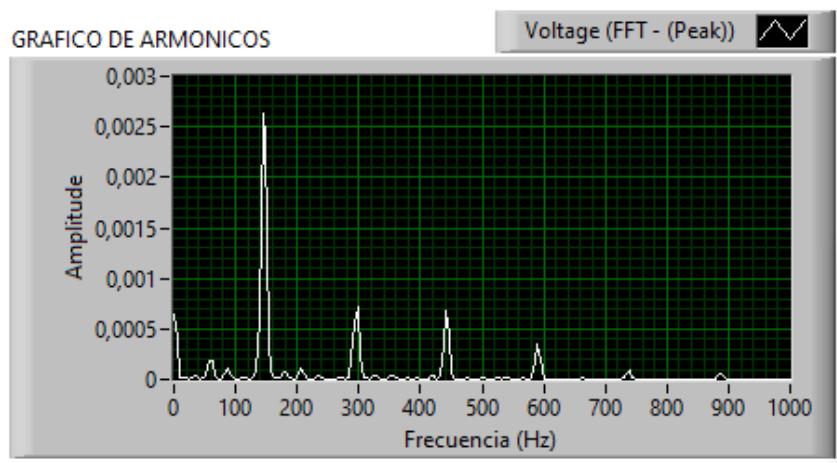


Fuente: autor

En este efecto se aprecian los recortes de los picos de onda de la señal de audio. Este nivel de recorte aumentará si se aumenta el nivel de distorsión (*clipping*) y se presenta de igual forma para todas las cuerdas del violonchello.

Así mismo el usuario puede manejar la ganancia del circuito y dar como resultado una onda más fuerte o más débil, como lo muestran las Figuras 39 y 40.

Figura 41. Armónicos con el efecto distorsión al 50% y ganancia al 100% sobre cuerda RE (146.8 Hz)

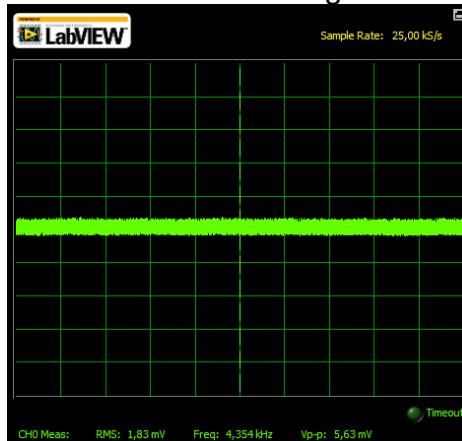


Fuente: autor

Este pedal no presenta efectos considerables sobre los armónicos, mas allá de disminuirles un poco su amplitud con respecto a la señal original, como lo muestra la Figura 41.

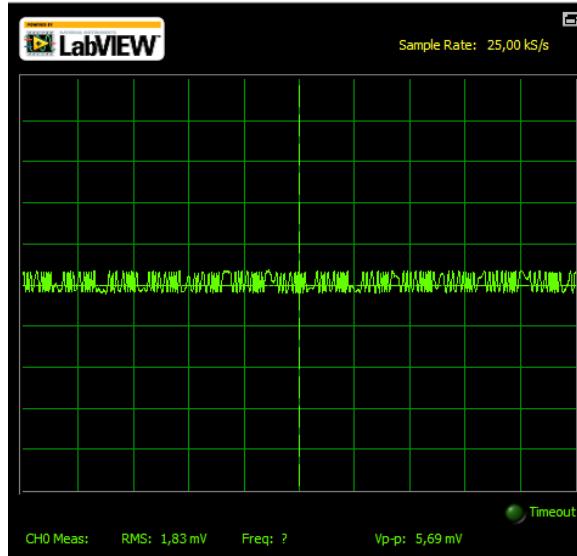
6.2 EFECTO COMPRESOR

Figura 42. Compresor sobre la cuerda DO con ganancia al 100% y umbral al 80%



Fuente: autor

Figura 43. Efecto compresor sobre la cuerda DO pulsada con ganancia al 100% y umbral al 80%



Fuente: autor

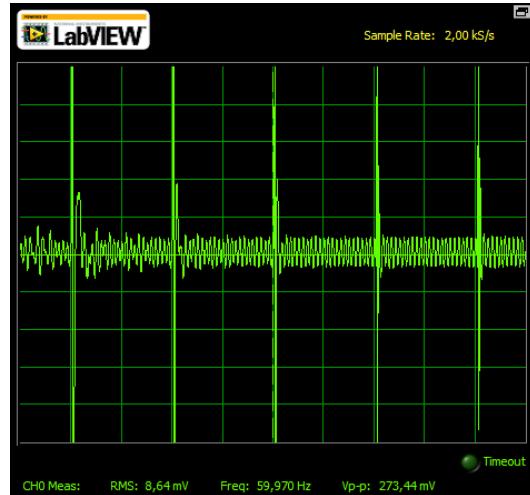
Efectivamente la amplitud del tono de una sola cuerda queda circunscrita a una envolvente producida por el amplificador operacional que controla o activa la fotorresistencia. Es por esto que la amplitud de la onda se encoje, en la medida del valor de umbral que el usuario escoge, y se ajusta a un nivel de donde no puede pasar o al menos pasa una parte del pico de onda. Este efecto es más visible cuando se tocan varias notas en el tiempo.

El único efecto que produce sobre los armónicos es reducir o aumentar su amplitud (aún más que el efecto distorsión), guardando su mismo comportamiento frecuencial y vibracional como se observa en la Figura 42 y Figura 43.

6.3 EFECTO DELAY

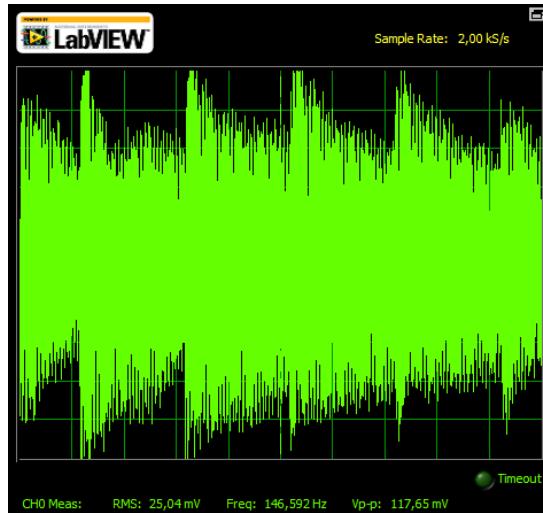
Este efecto es más visible y evidente cuando se muestran las capturas a lo largo de un espacio de tiempo, sin embargo, se decide añadir capturas temporales porque se producen algunos cambios importantes en algunos tonos.

Figura 44. Efecto *delay* sobre la cuerda DO frotada con eco al 40%, *mix* al 50% y repetición al 80%



Fuente: autor

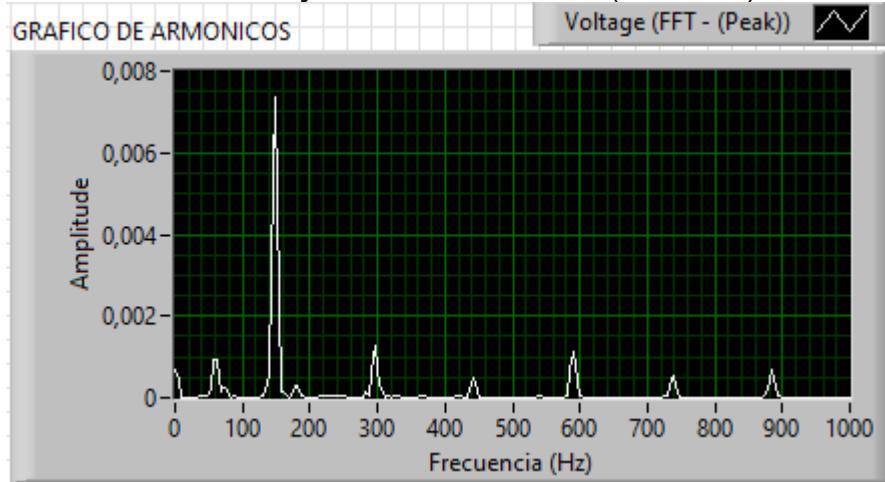
Figura 45. Efecto *delay* sobre la cuerda DO pulsada con eco al 40%, *mix* al 50% y repetición al 80%



Fuente: autor

En estas capturas (*Figuras 44 y 45* respectivamente) se pueden apreciar las repeticiones del eco. Se aumenta el nivel de repeticiones al 80% para que se pueda ver más claramente en un pantallazo del osciloscopio. Por lo demás, este efecto no produce alteraciones en la frecuencia más allá de las repeticiones sobre un mismo sonido.

Figura 46. Armónicos con *delay* sobre la cuerda RE (146.8 Hz)



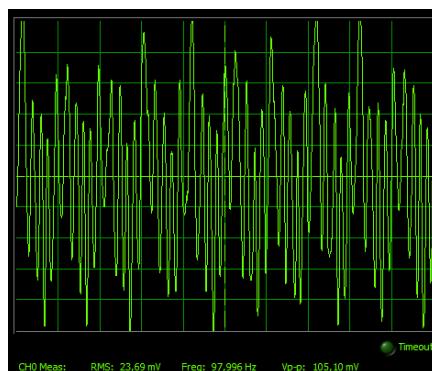
Fuente: autor

Como se puede apreciar (*Figura 46*), este pedal casi no produce alteraciones en los armónicos, pues el objetivo principal es solo generar un eco que se repite (según programación del usuario) después de cesar el sonido.

Este pedal obtiene la totalidad de su funcionamiento por la pastilla PT2399, así que a veces cuando la repetición y el eco tienen ciertos valores, la onda se realimenta de forma curiosa produciendo la sensación de un sonido continuo que pareciera como si se repitiera indefinidamente. Así como también en algunas ocasiones repite y altera incluso los sonidos de ruido generados al desconectar/conectar el *plug* de audio o incluso cuando se enciende de forma brusca. De igual manera, esto se logró disminuir gracias a una película de caucho entre la placa del circuito y la caja metálica de la pedalera.

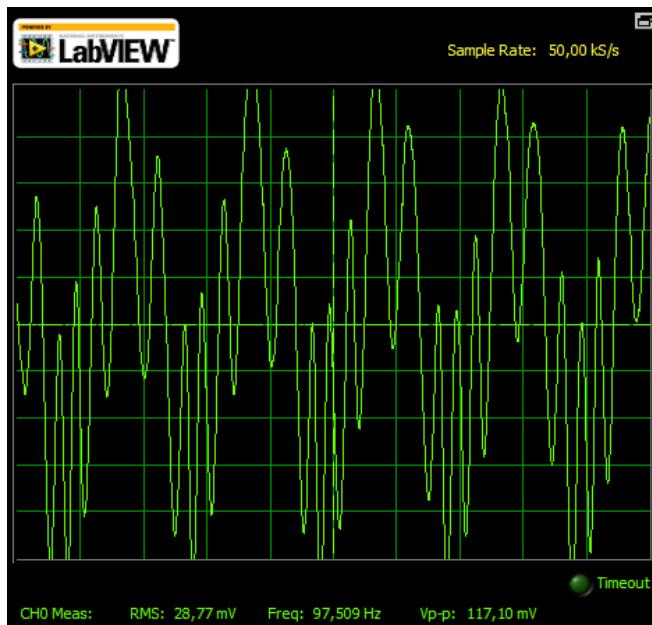
6.4 EFECTO REVERB

Figura 47. Efecto reverb sobre la cuerda SOL frotada con ganancia al 100%, reverb al 80% y repeticion al 80%



Fuente: autor

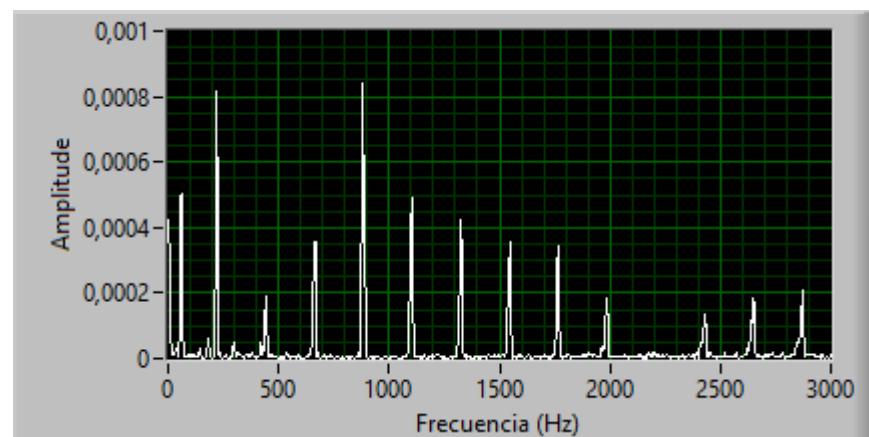
Figura 48. Efecto reverb sobre la cuerda SOL frotada con ganancia al 100%, reverb al 50% y repeticion al 80%



Fuente: autor

En este pedal se evidencian en el tiempo y gráficamente (*Figuras 47 y 48* respectivamente) mucho más fácilmente la riqueza de los armónicos que deja este efecto. La pastilla BTR-2H facilita el trabajo, haciendo que la onda original genere más rebotes de la onda original. Sin embargo, los resultados se aprecian mejor en el cuadro de armónicos (*Figura 47*).

Figura 49. Armónicos con el efecto reverb sobre la cuerda SOL



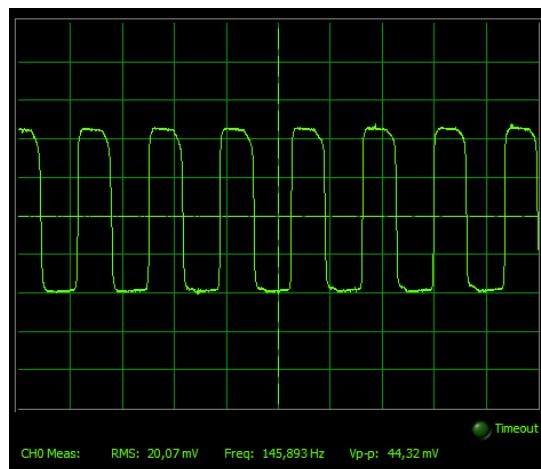
Fuente: autor

Este cuadro de armónicos revela cómo los armónicos por arriba del armónico dominante (el propio de la nota de la cuerda 98.5 HZ) no solo no se disminuyen, sino que algunos (como el 4to armónico) alcanzan casi a tener la misma altura que el original. Así es como se presenta gráficamente en la onda de audio efectos como la reverberación de un baño o un espacio debido a la reflexión de las ondas, las cuales suman armónicos a la señal original, el cual posee suficiente espacio como para producir eco, pero su disposición geométrica no es lo suficientemente regular como para devolver un eco perfectamente audible y claro.

6.5 EFECTOS DISTORSION + COMPRESIÓN + *DELAY* + *REVERB*

Finalmente se observa la onda de audio resultante con las cuatro pedaleras en cascada (*Figuras 49 hasta 53*). En este caso la mejor forma de apreciar cualitativamente el desempeño de la onda procesada es mostrar diferentes pantallazos segundos después de pulsar la cuerda. para esto se hacen diferentes tomas al momento de pulsar la cuerda, 2, 4, 6, y 8 segundos después para comparar los resultados.

Figura 49. Señal de salida sobre la cuerda RE con todos los efectos en cascada inmediatamente después de pulsada



Fuente: autor

Figura 50. Señal de salida sobre la cuerda RE con todos los efectos en cascada 2 segundos despues de pulsada.



Fuente: autor

Figura 51. Señal de salida sobre la cuerda RE con todos los efectos en cascada 4 segundos despues de pulsada.



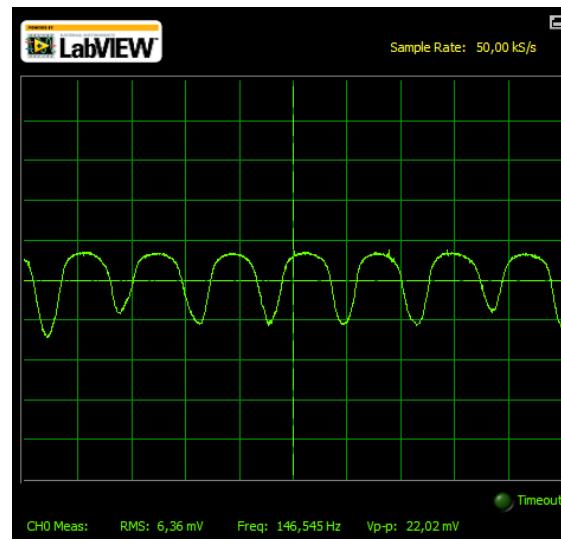
Fuente: autor

Figura 52. Señal de salida sobre la cuerda RE con todos los efectos en cascada 6 segundos despues de pulsada.



Fuente: autor

Figura 53. Señal de salida sobre la cuerda RE con todos los efectos en cascada 8 segundos despues de pulsada.



Fuente: autor

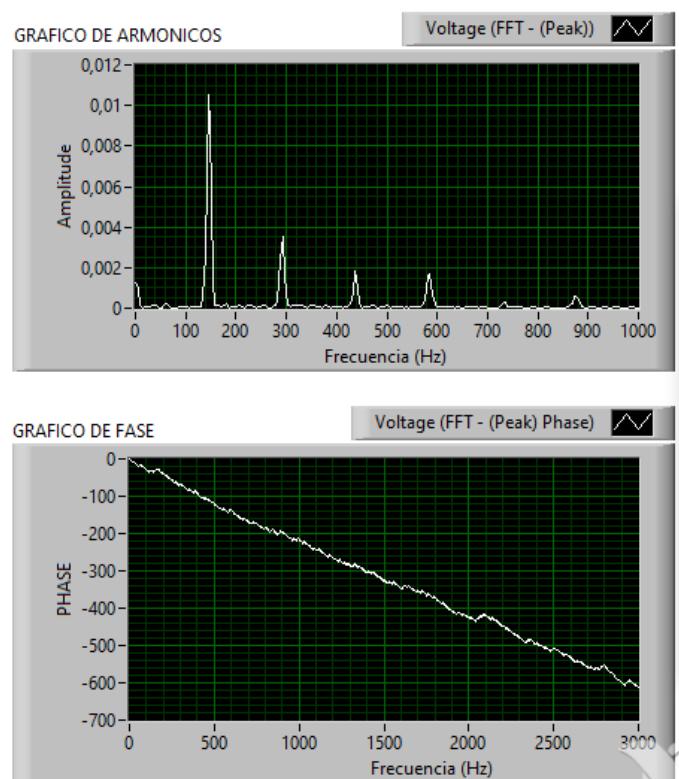
Aquí se pueden observar los recortes debido a la distorsión (al 90% y 80% de ganancia, *Figura 49*), ademas una mayor ganancia que la de la onda original (se tuvo que adecuar y ecualizar un poco el sonido y los efectos para que se escuchara apropiadamente). Tambien se observa que el efecto compresor (compresion al 50% y ganancia al 50%, *Figura 50*), al no permitir picos mayores a 32 mV, al actuar

conjunto a la distorsión hace que la señal no se sature al punto de realimentarse como suele pasar cuando un microfono es acercado a su parlante, de hecho la onda sale bien limpia porque este efecto comprime los sobrepicos desagradables (incluso los ruidos indeseados al conectar o desconectar el cable de audio. *Figura 51*). Hasta que finalmente se atenúa y vuelve a su forma casi original (*Figura 53*).

El efecto compresor mantiene la forma de onda ajustada al umbral y de paso ayuda a mantener la ganancia unos instantes mas. El efecto del *delay* y sus repeticiones pueden ser vistos al confrontar las imágenes en los segundos posteriores a la pulsación de la cuerda.

En estos diagramas de frecuencia (*Figura 54*), se añade el gráfico de fase para comprender mejor este gran filtro. A diferencia de los anteriores efectos aquí se aprecia un cambio de fase más bien lineal, en donde la fase va cambiando conforme aumenta la frecuencia. Esto se da así porque conforme las repeticiones de la señal añadidas por el efecto *delay* van corriendo la fase de la señal al superponerse unas a otras. Por supuesto que con otra configuración de los potenciómetros de cada pedal se obtendrá una curva de fase menos ‘organizada’.

Figura 54. Armonicos y diagrama de fase con todos los efectos en cascada sobre la cuerda RE.



Fuente: autor

Con respecto a los armónicos, estos se disminuyen o aumentan dependiendo de las ganancias programadas en cada uno de los pedales, sin embargo, de una u otra forma se ven fortalecidos y reforzados (aunque no tanto como el efecto *reverb* funcionando solo). En realidad, el efecto distorsión es también causal de disminuir la potencia a los armónicos altos (inicialmente se creía que era por el compresor) para centrarse sobre todo en el armónico principal y los cercanos a este.

7.0 CONCLUSIONES

En este trabajo se generó el diseño y la implementación de una pedalera de efectos para mejorar el desempeño de un violonchello acústico. Lo más importante de esta pedalera es que permite usar diferentes tipos de efectos tales como *delay*, *reverb*, *distorsión* y *compresor* que le conceden al instrumento un mejor *performance* musical.

El efecto *reverb* es un caso especial del efecto *delay*, pues ambos usan circuitos integrados PT2399 anidados, dependiendo de la configuración del usuario, la ausencia de uno podría reemplazar la existencia del otro.

La distorsión total de este efecto puede ser dividida en suave, media y dura; siendo la diferencia entre ellos un nivel en el recorte y el deformamiento de la onda original; de acuerdo a esto se obtendrá diferentes tipos de distorsión como el *overdrive*, *High distortion*, *Boss distortion*, entre otros.

Existe una diferencia importante entre la tierra del circuito y el polo negativo de la alimentación. Estos pedales utilizan sus cajas metálicas y el cable de audio como tierra y cuando no están funcionando tienen el mismo potencial eléctrico. Estas cajas mostraron un desempeño alto como aislantes del ruido.

Es posible que dentro del ancho de banda utilizado y algunas otras características de modulación y control de ganancia permitan que esta pedalera pueda ser usada por otros instrumentos eléctricos que posean un rango de frecuencias parecido al del violonchelo como violines, violas entre otros o que posean un micrófono con una etapa de acondicionamiento previa para ser compatibles con el ancho de banda usado.

La puesta de un caucho entre la placa y la tarjeta electrónica de los efectos eliminó significativamente la presencia de armónicos altos, y algunos sobre picos producidos por la estática sobre todo al conectar y desconectar el *plug Jack* o al momento de encender algunos de los pedales.

La alimentación por cargador DC supone estabilidad en la alimentación de los circuitos, pero podría ser potencial de riesgo al aumentar el ruido y crear corrientes parásitas dependiendo del tiempo en que permanezca conectado y encendido, además de sobretensiones que puedan aparecer en la red. Mientras tanto la alimentación con batería, aunque sea menos estable evitara este posible problema.

El efecto de audio resultante depende del orden como se hayan conectado los efectos en la línea.

Dentro del análisis de la transformada rápida de Fourier (FFT), los efectos Reverb y Delay aumentaron considerablemente el número de armónicos, así como la magnitud de estos, mientras que los efectos compresor y Distorsión limitan algunas de las magnitudes de los mismos, pero sus efectos son más considerables en el análisis del tiempo.

8.0 RECOMENDACIONES

Este trabajo fue posible gracias a los conocimientos técnicos obtenidos en el pregrado de ingeniería electrónica y conocimientos técnicos en música, sería interesante que otros estudiantes incursionaran en estos campos para desarrollar otras técnicas que permitan la creación de nuevos sonidos y dispositivos, así mismo incentivar el estudio de nuevos proyectos de este tipo.

La interfaz gráfica de usuario se desarrolló como herramienta de apoyo para comprender mejor el tratamiento de las señales de audio en frecuencia y un espacio visible/audible para el usuario, no como parte intrínseca del proyecto en sí mismo. Para esto se utilizó el Guide de Labview de National Instruments y una tarjeta de adquisición de datos compatible (MY DAQ) para la lectura de las señales de audio a través del puerto especializado con el fin de observar el comportamiento de las señales en tiempo real, y poder observar el comportamiento de los efectos aquí señalados.

La calidad del tratamiento de las señales queda limitada y circunscrita a la calidad de los elementos eléctricos y electrónicos disponibles. Así mismo el prototipo básico propuesto se puede robustecer para que tolere mejor el maltrato físico y eléctrico.

Como posibles trabajos de investigación a futuro se puede contemplar la digitalización de este proyecto en alguna tarjeta desarrolladora, comparar la respuesta con este proyecto análogo y también existe la posibilidad de ampliarlo o desarrollarlo a otros instrumentos.

9.0 BIBLIOGRAFIA

CEDRA, Adel. y SMITH, Kenneth. Microelectronic circuits. C. 4ta ed. Oxford express. 1999. p. 134-145, 234-241, 301-302.

CUADRADO MÉNDEZ, Francisco. y DOMÍNGUEZ LOPEZ, Juan. Teoría y técnica del sonido. Mexico: Sintesis. 2019. p. 75-79

DORF, Richard. y SVOBODA, James. Circuitos electricos. Boston: Alfaomega. 2006. p. 94-95, 167-170, 203, 28-209.

HUBER M, David. Audio Production: Modern Recording Techniques. 3ra ed. Boston: Prentice Hall. 2015. P. 79-80, 103-106, 169-183.

HUNTER, Dave. Guitar Effects Pedals: The Practical Handbook. New York: Backbeat books. 2da edición. 2013. p. 67-70, 79-81, 99-110.

OPPENHEIM, Robert. y VIRSCKIT, Alan V. y WILLSKY, Alan. Señales y Sistemas. 2da ed. New York: Prentice Hall. 2001. p. 189-191, 234-248, 311-313.

SERWAY, Raymond A. y JEWETT, John. Física para ciencia e ingeniería. Boston: Mc Graw Hill. 5ta edición. 2002. p. 123-124, 149-154, 234-237, 301-308, 814-816.

TOMASI, Wayne. Sistemas de comunicaciones electrónicas. New York: Prentice Hall. 2003. p. 145-147, 234.

YOUNG, Hugh; FREEDMAN, Roger. Física universitaria. Tomo I y II. 5ta ed. New York: Addison-Wesley. 2010. p. 156-165, 171-174, 345-358, 490-492.

ZAFRA, Julian. Ingeniería de sonido. Conceptos, fundamentos y casos prácticos. Madrid: Ra Ma. 2018. p. 23-56, 93-97.

CASTAÑO Marcos Víctor. Pedalera eléctrica para Guitarra. Universidad de Cataluña ["en línea"] Disponible en: [https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/88833/victor.castano_110677.pdf?sequence=1&isAllowed=".1](https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/88833/victor.castano_110677.pdf?sequence=1&isAllowed=) de diciembre de 2022.

Environmental Effects of Producing Electric Power. Part II. US government printing office. 1970. p. 9-10.

Which pedals are better: digital or analog? [blog] <https://deplike.com/blog/which-guitar-pedals-are-better-digital-or-analog/>. 15 de enero de 2021.

Amplificadores operacionales para audio. ["en línea"]
<https://www.proyectoelectronico.com/amplificadores-audio/amplificadores-operacionales.html>. 23 de marzo de 2021.

Ecuación y sus técnicas. ["en línea"]
<https://www.armadamusic.com/university/music-production-articles/eq-explained-the-basics>. 30 de abril de 2021.

Nuts and Volts everythings for electronics ["en línea"]. Disponible en:
<https://www.nutsvolts.com/tech-forum/question/audio-leveler>. 1 de diciembre de 2022.

Belton Engineering Co.LTD. ["en línea"]. Disponible en:
<https://pedalpartsandkits.com/content/btdr2.pdf>. 1 de diciembre de 2022.

9.0 ANEXOS

Anexo A. Pedalera eléctrica para violonchello.



Anexo B. Interfaz grafica para interpretacion de señales de audio.

PEDALERA ELECTRICA PARA VIOOLONCHELO.

