

# Universidad de Alcalá

## Escuela Politécnica Superior

**Grado en Ingeniería en Electrónica y Automática  
Industrial**

### **Trabajo Fin de Grado**

Diseño e implementación de un sistema multiefecto integrado  
para guitarra eléctrica

ESCUELA POLITECNICA  
SUPERIOR

**Autor:** Miguel Ángel Sánchez Esteban

**Tutor:** Javier Macías Guarasa

2022



# UNIVERSIDAD DE ALCALÁ

## ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR

**Grado en Ingeniería en Electrónica y Automática Industrial**

**Trabajo Fin de Grado**

**Diseño e implementación de un sistema multiefecto integrado  
para guitarra eléctrica**

Autor: Miguel Ángel Sánchez Esteban

Tutor: Javier Macías Guarasa

**Tribunal:**

**Presidente:** Ana Isabel de Andrés Rubio

**Vocal 1º:** Alejandro Martínez Arribas

**Vocal 2º:** Javier Macías Guarasa

Fecha de depósito: 10 de junio de 2021



# Agradecimientos

*"Los patrones de la música y de todas las artes son las  
claves del aprendizaje".*

Platón.

En primer lugar, me gustaría dar las gracias a mi tutor Javier Macías Guarasa, por confiar en mí y en el proyecto, sin él no hubiera tenido la oportunidad de presentar este trabajo tal y como deseaba.

Quiero agradecer a todas las personas que he conocido durante mi etapa universitaria, por el gran apoyo y cariño recibido. Estas personas han celebrado conmigo los éxitos, sufrido los fracasos y me han hecho ser el profesional y la persona que soy ahora.

Quiero dar las gracias a mis amistades fuera del mundo académico, las cuales me han enseñado las lecciones que no se enseñan en las aulas, que a veces en la vida hay que dar un paso atrás para dar dos hacia adelante, y desviarse un poco del camino para volver a él.

Por último, doy las gracias a mi familia, y en especial a las dos personas que más me han acompañado durante toda mi vida, mis padres. Aunque a veces no hablemos el mismo idioma, nunca me ha faltado su apoyo y consejo, factores fundamentales tanto en los momentos más duros como en los más felices de mi carrera universitaria.



# Resumen

Los efectos para guitarra eléctrica son dispositivos electrónicos externos al instrumentos y cuya activación se realiza con el pie, de ahí que se conozcan comúnmente como 'pedales'.

En este documento se registrará la motivación, el análisis, el diseño y la fabricación de un sistema de efectos para guitarra eléctrica incorporado en el propio instrumento.

Este sistema presentará espacio para añadir 4 efectos, con un sistema de selección manual y alimentación incluidos en una carcasa que se montará en una guitarra eléctrica

El objetivo será analizar la viabilidad del sistema planteado, y comprobar si pudiera sustituir a los sistemas de efectos basados en pedales,





# Abstract

The electric guitar's effects are electronics devices external to the instrument and whose turning on is made with the foot, hence they are known as 'pedals'.

In this document will record the motivation, the analysis, the design and the making of an effects system for electric guitar included in the instrument.

The system will present space to include 4 effects, with a manual selection and power system added in a case that will be attached to a electric guitar.

The goal will be analyze the viability of the proposed system, and check if it will replace the pedals based effects systems.



# Índice general

<b>Resumen</b>	<b>vii</b>
<b>Abstract</b>	<b>ix</b>
<b>Índice general</b>	<b>xi</b>
<b>Índice de figuras</b>	<b>xvii</b>
<b>Índice de tablas</b>	<b>xxi</b>
<b>1 Introducción</b>	<b>1</b>
1.1 Motivación y planteamiento de la idea . . . . .	1
1.2 Objetivos del proyecto . . . . .	3
1.3 Contexto . . . . .	4
1.3.1 Guitarra eléctrica . . . . .	4
1.3.1.1 Clavijero . . . . .	4
1.3.1.2 Cejilla o cejuela . . . . .	5
1.3.1.3 Trastes . . . . .	5
1.3.1.4 Tensor del mástil o alma . . . . .	5
1.3.1.5 Diapasón . . . . .	6
1.3.1.6 Mástil . . . . .	6
1.3.1.7 Cuerpo . . . . .	6
1.3.1.8 Pastillas . . . . .	7
1.3.1.9 Selector de pastillas y controles de volumen y tono . . . . .	8
1.3.2 Pedales de guitarra eléctrica . . . . .	9
1.3.2.1 Jack de audio estéreo 6.35mm . . . . .	9
1.3.2.2 Jack de audio Mono 6.35mm . . . . .	10
1.3.2.3 Jack de 9V . . . . .	10
1.3.2.4 Interruptor 3PDT . . . . .	10
1.3.2.5 PCB . . . . .	11
1.3.2.6 Potenciómetros . . . . .	11
1.4 Organización de la memoria . . . . .	12

<b>2</b>	<b>Estudio y planificación</b>	<b>13</b>
2.1	Introducción . . . . .	13
2.2	Análisis previo . . . . .	13
2.3	Planteamiento . . . . .	16
2.3.1	Elección de la cantidad y el tipo de efectos . . . . .	16
2.3.1.1	Distorsionador . . . . .	16
2.3.1.2	Retardo . . . . .	17
2.3.2	Elección de la guitarra . . . . .	17
2.4	Esquema general del proyecto . . . . .	19
2.4.1	Efectos . . . . .	19
2.4.2	Alimentación . . . . .	20
2.4.3	Selección . . . . .	20
2.4.4	Carcasa . . . . .	20
<b>3</b>	<b>Diseño y fabricación</b>	<b>21</b>
3.1	Introducción . . . . .	21
3.2	Efecto de distorsión . . . . .	22
3.2.1	Introducción . . . . .	22
3.2.2	<i>Buffer</i> de entrada . . . . .	23
3.2.2.1	Análisis en CC . . . . .	24
3.2.2.2	Análisis en CA . . . . .	25
3.2.2.3	Análisis en frecuencia . . . . .	26
3.2.2.4	Simulaciones . . . . .	27
3.2.2.5	Especificaciones del diseño . . . . .	29
3.2.3	Etapa de ganancia . . . . .	30
3.2.3.1	Primera etapa . . . . .	31
3.2.3.2	Simulaciones de la primera etapa) . . . . .	33
3.2.3.3	Segunda etapa . . . . .	34
3.2.3.4	Simulaciones de la segunda etapa . . . . .	36
3.2.3.5	Especificaciones del diseño . . . . .	37
3.2.4	Etapa de recorte . . . . .	38
3.2.4.1	Simulaciones . . . . .	38
3.2.4.2	Especificaciones del diseño . . . . .	38
3.2.5	Etapa de control de tono . . . . .	39
3.2.5.1	Análisis en frecuencia . . . . .	40
3.2.5.2	Simulaciones . . . . .	42
3.2.5.3	Especificaciones del diseño . . . . .	44

3.2.6	Buffer de salida . . . . .	45
3.2.6.1	Análisis en CA . . . . .	45
3.2.6.2	Análisis en frecuencia . . . . .	46
3.2.6.3	Simulaciones . . . . .	47
3.2.6.4	Especificaciones del diseño . . . . .	48
3.2.7	Referencia de tensión . . . . .	48
3.2.7.1	Especificaciones del diseño . . . . .	49
3.2.8	Circuito completo . . . . .	50
3.2.9	Diseño de la placa de circuito impreso (PCB) . . . . .	51
3.2.10	Fabricación . . . . .	52
3.3	Retardo ( <i>delay</i> ) . . . . .	53
3.3.1	Introducción . . . . .	53
3.3.2	Implementación: integrado PT2399 . . . . .	54
3.3.2.1	Circuito de <i>Delay</i> . . . . .	55
3.3.2.2	Circuito de Echo . . . . .	55
3.3.3	Funcionamiento interno . . . . .	57
3.3.4	Filtro paso bajo (entrada) . . . . .	58
3.3.4.1	Simulaciones . . . . .	61
3.3.4.2	Especificaciones del diseño . . . . .	62
3.3.5	Conversión/Retardo . . . . .	63
3.3.5.1	Especificaciones del diseño . . . . .	64
3.3.6	Etapas de filtrado intermedia . . . . .	64
3.3.6.1	Especificaciones del diseño . . . . .	65
3.3.7	Referencia de tensión . . . . .	65
3.3.7.1	Especificaciones del diseño . . . . .	65
3.3.8	Alimentación regulada . . . . .	65
3.3.9	Efecto de echo . . . . .	66
3.3.10	Modificaciones extras . . . . .	66
3.3.10.1	Control de volumen de las repeticiones . . . . .	66
3.3.10.2	Control del tiempo de retardo . . . . .	67
3.3.10.3	Buffers de entrada y salida . . . . .	68
3.3.10.4	Especificaciones del diseño . . . . .	70
3.3.11	Circuito completo . . . . .	71
3.3.12	Diseño de la placa de circuito impreso (PCB) . . . . .	72
3.3.13	Fabricación . . . . .	73
3.4	Placa de alimentación . . . . .	74
3.4.1	Especificaciones . . . . .	74

3.4.2	Diseño de la placa de circuito impreso (PCB) . . . . .	75
3.4.3	Fabricación . . . . .	76
3.5	Placa de selección . . . . .	77
3.5.1	Especificaciones . . . . .	77
3.5.2	Diseño de la placa de circuito impreso (PCB) . . . . .	80
3.5.3	Fabricación . . . . .	81
3.6	Diseño de la carcasa . . . . .	82
3.6.1	Marco . . . . .	83
3.6.2	Base . . . . .	84
3.6.3	Selección . . . . .	85
3.6.3.1	Placa de selección . . . . .	85
3.6.3.2	Interruptores . . . . .	86
3.6.4	Botón de alimentación . . . . .	86
3.6.5	Controles . . . . .	87
3.6.5.1	Base . . . . .	87
3.6.5.2	Piezas de los controles . . . . .	88
3.6.6	Jack de entrada/Batería . . . . .	88
3.6.7	Jack de salida . . . . .	89
3.6.8	Piezas extra . . . . .	89
3.6.9	Conjunto . . . . .	90
<b>4</b>	<b>Conclusiones y líneas futuras</b>	<b>93</b>
4.1	Introducción . . . . .	93
4.2	Conclusiones . . . . .	93
4.3	Líneas futuras . . . . .	94
4.3.1	Añadir más efectos . . . . .	94
4.3.2	PCBs mecanizadas . . . . .	94
4.3.3	Sustitución de cables . . . . .	94
4.3.4	Mejora de la carcasa . . . . .	94
<b>5</b>	<b>Presupuesto</b>	<b>95</b>
5.1	Gastos materiales . . . . .	95
5.1.1	Guitarra eléctrica . . . . .	95
5.1.2	Efecto de distorsión . . . . .	96
5.1.3	Placa alimentación . . . . .	96
5.1.4	Efecto de retardo . . . . .	97
5.1.5	Placa selección . . . . .	97
5.1.6	Carcasa . . . . .	97

5.2	Gastos de herramientas . . . . .	98
5.3	Gastos de mano de obra . . . . .	98
5.3.1	Desglose de horas . . . . .	98
5.3.2	Gastos totales mano de obra . . . . .	98
5.4	Gastos totales del proyecto . . . . .	99
<b>Bibliografía</b>		<b>101</b>
<b>Apéndice A Herramientas y recursos</b>		<b>103</b>





# Índice de figuras

1.1	Comparativa de cuerpo de guitarra modelos Stratocaster (izquierda) y LesPaul (derecha) (tomado de [1][2]) . . . . .	3
1.2	Guitarra eléctrica modelo Epiphone Les Paul Studio (tomado de [3]) . . . . .	4
1.3	Clavija . . . . .	4
1.4	Cejuela . . . . .	5
1.5	Trastes . . . . .	5
1.6	Alma . . . . .	5
1.7	Diapasón . . . . .	6
1.8	Tipos de mástiles . . . . .	6
1.9	Tipos de cuerpos . . . . .	6
1.10	Pastillas <i>Single Coil</i> (tomado de [4]) . . . . .	7
1.11	Ley de Faraday . . . . .	7
1.12	Imanes de las pastillas (tomado de [4]) . . . . .	7
1.13	Pastillas <i>Humbuckers</i> (tomado de [4]) . . . . .	8
1.14	Esquema del control de tono y volumen de una guitarra eléctrica . . . . .	8
1.15	Ejemplos de pedales (tomado de [5]) . . . . .	9
1.16	Esquema interno de un pedal (tomado de [6]) . . . . .	9
1.17	<i>Jack</i> de audio estéreo . . . . .	9
1.18	<i>Jack</i> de audio mono . . . . .	10
1.19	<i>Jack</i> de alimentación de 9V . . . . .	10
1.20	Interruptor 3PDT . . . . .	10
1.21	Conexiones del Interruptor 3PDT . . . . .	11
1.22	PCB . . . . .	11
1.23	Potenciómetro . . . . .	11
2.1	Plataforma de pruebas de efectos . . . . .	14
2.2	Ejemplos de circuitos de <i>buffers</i> . . . . .	15
2.3	Ejemplos de circuitos de control de tono. . . . .	15
2.4	Comparación de los distintos efectos de distorsión (tomado de [7]) . . . . .	16

2.5	Representación del efecto de <i>delay</i> (tomado de [8]) . . . . .	17
2.6	Recorte de una guitarra eléctrica convencional . . . . .	18
2.7	Guitarra <i>Hofner</i> modelo <i>Shorty</i> (tomado de [9]) . . . . .	18
3.1	<i>Pedal Gibson Maestro Fuzz Tone 1</i> (tomado de [10]) . . . . .	22
3.2	Esquema del <i>buffer</i> de entrada del efecto de distorsión . . . . .	23
3.3	Esquema del <i>buffer</i> de entrada distorsión en CC . . . . .	24
3.4	Polarización del <i>buffer</i> de entrada del efecto de distorsión . . . . .	24
3.5	Esquema equivalente en CA del <i>buffer</i> de entrada del efecto de distorsión . . . . .	25
3.6	Esquema equivalente en CA (simplificado) del <i>buffer</i> de entrada del efecto de distorsión . . . . .	25
3.7	Análisis en frecuencia del <i>buffer</i> de entrada del efecto de distorsión . . . . .	26
3.8	Circuito de la simulación del <i>buffer</i> de entrada del efecto de distorsión . . . . .	27
3.9	Impedancia de entrada de <i>buffer</i> de entrada del efecto de distorsión . . . . .	27
3.10	Comportamiento del <i>buffer</i> de entrada distorsión en función de $R_2$ . . . . .	28
3.11	Diagrama de Bode del <i>buffer</i> de entrada del efecto de distorsión . . . . .	29
3.12	Etapas de ganancia del efecto de distorsión . . . . .	30
3.13	Primera etapa de ganancia del efecto de distorsión. . . . .	31
3.14	Polarización de la primera etapa de ganancia del efecto de distorsión . . . . .	32
3.15	Circuito de la primera etapa de ganancia del efecto de distorsión . . . . .	33
3.16	Señales de la primera etapa de ganancia del efecto de distorsión . . . . .	33
3.17	Diagrama de Bode de la primera etapa de ganancia del efecto de distorsión . . . . .	34
3.18	Segunda etapa de ganancia del efecto de distorsión . . . . .	34
3.19	Circuito de la segunda etapa de ganancia del efecto de distorsión . . . . .	36
3.20	Señales de la segunda etapa de ganancia distorsión . . . . .	36
3.21	Diagrama de Bode de la segunda etapa de ganancia distorsión . . . . .	37
3.22	Etapas de recorte distorsión . . . . .	38
3.23	Simulación de la etapa de recorte distorsión . . . . .	38
3.24	Circuito del control de tono distorsión . . . . .	39
3.25	Análisis del control de tono distorsión (mallas) . . . . .	40
3.26	Simulación del control de tono distorsión . . . . .	42
3.27	Diagrama de Bode del control de tono (T50 B50 M50) . . . . .	42
3.28	Diagrama de Bode del control de tono distorsión . . . . .	43
3.29	Diagrama de Bode del control de tono distorsión (T75 B50 M25) . . . . .	44
3.30	Circuito del <i>buffer</i> de salida distorsión . . . . .	45
3.31	Análisis en CA del <i>buffer</i> de salida distorsión . . . . .	45
3.32	Circuito equivalente del <i>buffer</i> de salida distorsión . . . . .	45
3.33	Análisis en frecuencia del <i>Buffer</i> de salida distorsión . . . . .	46

3.34 Simulación del <i>buffer</i> salida distorsión . . . . .	47
3.35 Simulación de la impedancia de salida del <i>buffer</i> de salida distorsión . . . . .	47
3.36 Diagrama de bode del <i>buffer</i> salida distorsión . . . . .	47
3.37 Referencia de tensión distorsión . . . . .	48
3.38 Circuito completo distorsión . . . . .	50
3.39 PCB del efecto de distorsión . . . . .	51
3.40 PCB placa distorsión fabricada . . . . .	52
3.41 <i>Maestro EchoFlex EP-3</i> . . . . .	53
3.42 Pines PT2399(tomado de [11]) . . . . .	54
3.43 Circuito <i>Delay</i> (tomado de [11]) . . . . .	55
3.44 Circuito <i>Echo</i> (tomado de [11]) . . . . .	55
3.45 Conexiones internas PT2399(tomado de [11]) . . . . .	56
3.46 Esquema simplificado PT2399 . . . . .	56
3.47 <i>Delay datasheet</i> . . . . .	57
3.48 <i>Echo datasheet</i> . . . . .	57
3.49 Esquema de la configuración <i>Echo</i> (tomado de [11]) . . . . .	57
3.50 Partes del circuito <i>ECHO</i> (basado en [11]) . . . . .	58
3.51 Circuito del filtro de entrada del efecto de <i>delay</i> . . . . .	58
3.52 Diagrama de bode realimentación múltiple (tomado de [12]) . . . . .	59
3.53 Circuito de realimentación múltiple de orden 2 (izq) y 3 (drch) (basado en [12]) . . . . .	59
3.54 Diagrama de bode de realimentación múltiple aumentando el orden (tomado de [12]) . . . . .	59
3.55 Tabla de coeficientes (tomado de [12]) . . . . .	60
3.56 Simulación de la etapa de filtro de entrada del efecto de <i>delay</i> . . . . .	61
3.57 Señales de la etapa entrada del efecto de <i>delay</i> . . . . .	61
3.58 Diagrama de Bode de ganancia de la etapa de entrada del efecto de <i>delay</i> . . . . .	62
3.59 Diagrama de Bode de fase de la etapa entrada del efecto de <i>delay</i> . . . . .	62
3.60 Esquema de la etapa de conversión y retardo del efecto de <i>delay</i> (basado en [11]) . . . . .	63
3.61 Modulación <i>Delta Sigma delay</i> (tomado de [13]) . . . . .	63
3.62 Ejemplo de DAC con salida en tensión (tomado de [14]) . . . . .	64
3.63 Circuito del filtrado intermedio del efecto de <i>delay</i> . . . . .	64
3.64 Alimentación regulada del efecto de <i>delay</i> (tomado de [15]) . . . . .	65
3.65 Control de volumen del efecto de <i>delay</i> . . . . .	66
3.66 Tabla del efecto de <i>delay</i> (tomado de [11]) . . . . .	67
3.67 Control del efecto de <i>delay</i> . . . . .	67
3.68 Seguidor de tensión . . . . .	68
3.69 Circuito <i>Buffer</i> de entrada y salida del efecto de <i>delay</i> . . . . .	68
3.70 Simulación del <i>buffer</i> de entrada y salida del efecto de <i>delay</i> . . . . .	69

3.71 Diagrama de bode de los <i>buffers</i> de entrada y salida del efecto de <i>delay</i> . . . . .	70
3.72 Circuito completo del efecto de <i>delay</i> . . . . .	71
3.73 PCB del efecto de <i>delay</i> . . . . .	72
3.74 PCB placa del efecto de <i>delay</i> fabricada . . . . .	73
3.75 Batería y portabatería . . . . .	74
3.76 Switch de alimentación . . . . .	74
3.77 Circuito de alimentación . . . . .	74
3.78 Placa alimentación PCB . . . . .	75
3.79 PCB placa selección fabricada . . . . .	76
3.80 Pines por parejas del módulo de selección . . . . .	77
3.81 Conexión planteamiento 1 del módulo de selección . . . . .	78
3.82 Conexión planteamiento 2 del módulo de selección . . . . .	78
3.83 Conexión planteamiento final del módulo de selección . . . . .	78
3.84 Circuito final del módulo de selección . . . . .	79
3.85 Patrón de colores PCB del módulo de selección . . . . .	79
3.86 PCB placa del módulo de selección . . . . .	80
3.87 PCB placa del módulo de selección fabricada . . . . .	81
3.88 Marco . . . . .	83
3.89 Marco dividido . . . . .	83
3.90 Base . . . . .	84
3.91 Base partes . . . . .	85
3.92 Placa selección . . . . .	85
3.93 Placa selección (Piezas) . . . . .	85
3.94 Interruptores . . . . .	86
3.95 Interruptores pieza . . . . .	86
3.96 Botón alimentación . . . . .	86
3.97 Controles . . . . .	87
3.98 Controles base . . . . .	87
3.99 Controles placas . . . . .	88
3.100 Jack de entrada y batería . . . . .	88
3.101 Jack de salida . . . . .	89
3.102 Piezas extras . . . . .	89
3.103 Carcasa perspectiva . . . . .	90
3.104 Carcasa planta . . . . .	91
3.105 Carcasa despiece . . . . .	92

# Índice de tablas

3.1	Parámetros del <i>buffer</i> de entrada del efecto de distorsión . . . . .	29
3.2	Parámetros de la etapa de ganancia distorsión . . . . .	37
3.3	Parámetros de la etapa de recorte distorsión . . . . .	38
3.4	Parámetros de la etapa de control de tono distorsión . . . . .	44
3.5	Parámetros del <i>buffer</i> de salida distorsión . . . . .	48
3.6	Parámetros de la referencia de tensión distorsión . . . . .	49
3.7	Parámetros del filtro de entrada del efecto de <i>delay</i> . . . . .	62
3.8	Parámetros etapa de retardo y conversión del efecto de <i>delay</i> . . . . .	64
3.9	Parámetros de la etapa de filtrado intermedia del efecto de <i>delay</i> . . . . .	65
3.10	Parámetros de la referencia de tensión del efecto de <i>delay</i> . . . . .	65
3.11	Parámetros del <i>buffer</i> de entrada y salida del efecto de <i>delay</i> . . . . .	70
5.1	Presupuesto guitarra eléctrica . . . . .	95
5.2	Presupuesto etapa de distorsión . . . . .	96
5.3	Presupuesto placa de alimentación . . . . .	96
5.4	Presupuesto etapa de retardo . . . . .	97
5.5	Presupuesto placa de selección . . . . .	97
5.6	Presupuesto carcasa . . . . .	97
5.7	Gastos de herramientas . . . . .	98
5.8	Desglose de horas mano de obra . . . . .	98
5.9	Gastos totales de mano de obra . . . . .	98
5.10	Presupuesto total . . . . .	99



# Capítulo 1

## Introducción

### 1.1 Motivación y planteamiento de la idea

La motivación para la realización de este proyecto surge de los siguientes factores:

- **Afición por la música:** La música, siendo el cuarto arte, ha sido una evasión, compañera y aliada del autor durante toda su vida, herramienta que le ha ayudado en toda su formación tanto de manera directa como indirecta.
- **Mentalidad curiosa:** Este proyecto surgió de una investigación sobre las tecnologías implicadas en los pedales de guitarra eléctrica, con el único fin de aprender la forma de diseñarlos y fabricarlos. Dicha curiosidad por estos dispositivos derivó a un análisis más profundo de su funcionamiento, que llevó al autor a concluir que los conocimientos adquiridos en su formación podían aplicarse a este proyecto, y que éste podía dotarse de la suficiente calidad y rigurosidad como para ser temática de su Trabajo de Fin de Grado.

A continuación se pretenden exponer las conclusiones principales a las que se llegó de la investigación inicial para este proyecto, y que llevaron a proseguir con el mismo. El primer elemento bajo análisis fue el ya citado pedal de guitarra eléctrica.

Los pedales son dispositivos electrónicos externos a la guitarra eléctrica, con un accionamiento mediante el pie, y cuyo distintivo principal entre ellos es el diseño y la calidad de los componentes del circuito electrónico que tengan en su interior. Dicho circuito electrónico se compone fundamentalmente de *jacks* de audio y alimentación, un switch para su activación y controladores, todo ello conectado a una placa tipo PCB, que puede ser de mayor o menor tamaño dependiendo del tipo de pedal. Podríamos afirmar que los pedales son “cajas negras” preparadas para conectarse en cascada entre la salida de la guitarra y la entrada del amplificador.

En suma, para conseguir un sistema de efectos funcional, se necesitarían los siguientes elementos:

- **Alimentación para cada uno de los efectos.** Una práctica habitual es usar un adaptador AC-DC de 9V.
- **Cables especiales para conectar entre sí los efectos.** Son cables iguales a los empleados para conectar la guitarra al amplificador, pero más cortos.

- **Un soporte o *pedal board* para la organización de los efectos.** Se podría tener los efectos sueltos sin ningún problema, pero por lo general o bien por comodidad, optimización del espacio o por el número de efectos, la *pedal board* es un elemento muy usado.

Al accionarse con el pie, es preciso o bien que el músico se desplace al sitio dónde se encuentren los pedales, o bien una persona externa que haga tanto la selección como la configuración por ellos.

Podemos concluir de esta manera que:

- El tamaño “mínimo” de un pedal es el de su placa electrónica. Ponemos ésto entre “”debido a que hay que sumar el tamaño de los *jacks*, potenciómetros, batería, cables y caja metálica.
- Al ser dispositivos alimentados a 9V, se puede sustituir fácilmente su alimentación por una batería de ese voltaje, y prescindir de su conexión a la red eléctrica.
- El accionador con el pie resulta un selector de 2 posiciones con enclavamiento adaptado para que se accione con el pie, con lo que no resultaría complicado sustituirse por otro sistema de selección distinto.

El otro elemento bajo análisis es el propio instrumento, la guitarra eléctrica, y más en concreto el cuerpo de madera de la misma.

Una guitarra eléctrica se compone de dos clases de elementos fundamentales, la estructura de madera, y la electrónica.

La parte electrónica se divide a su vez en tres partes:

- Las pastillas, que recogen la vibración de las cuerdas y las transforman en una señal eléctrica.
- El control de tono y volumen, compuesto por tantos potenciómetros como se desee.
- Un selector de pastillas (en el caso de que haya más de una), que nos permita seleccionar la pastilla que queremos utilizar.

Estas tres partes se encuentran en el cuerpo del instrumento, y ocupan un espacio reducido del mismo, con lo que el resto del espacio es madera en general maciza.

Si bien es verdad que en instrumentos basados en la vibración, los materiales e incluso la forma pueden llegar a modificar el sonido, en nuestro caso al recoger el sonido de las cuerdas con las pastillas y prescindir de este modo de una caja de resonancia, la forma y el tamaño del cuerpo será prácticamente irrelevante.

La conclusión a la que podemos llegar con esto es que en una guitarra eléctrica sus componentes básicos necesarios se pueden compactar en un espacio bastante reducido, y el resto no es más que una carcasa maciza de madera cuya forma no condiciona el sonido de la misma.

Analizando los puntos anteriores, surgió la siguiente cuestión, que es el foco principal de estudio de este proyecto:

*¿Se podría sustituir toda la parte maciza y puramente estética del cuerpo de una guitarra por un sistema de efectos?*

Si se consiguiese ésto, podría ser el propio artista el que manipule la selección y configuración de los efectos desde su propio instrumento.



## 1.2 Objetivos del proyecto

El objetivo último es adaptar una guitarra eléctrica para que internamente tenga un sistema de efectos que replique de la forma más fiel posible el funcionamiento de los pedales convencionales. Recordamos en este punto que el foco del trabajo son los pedales analógicos. Existen sistemas digitales de efectos que emulan de forma bastante precisa el resultado de los analógicos, y proporcionan ventajas a nivel de selección y configuraciones que solo es posible con las tecnologías digitales actuales. Se escogió la tecnología analógica debido a un gusto personal por los efectos analógicos, y porque se consideró que supondría un mayor reto adaptar un sistema de efectos de esas características.

Sería importante que la guitarra final fabricada tuviera las siguientes características:

1. **Mantener los controles propios de la guitarra que se tome como base.** Las guitarras eléctricas convencionales suelen tener un control de volumen y un control de tono por cada pastilla que tenga la guitarra, ya que son los controles que se encontrarán más a mano para el músico. Estos controles nos permiten tanto apagar como reforzar el sonido de una pastilla de una manera muy sencilla, y configurar el tono que se quiera con sólo un potenciómetro.

Es importante que el diseño de la guitarra que se fabrique no implique modificar ni el tipo de controles ni la localización de los mismos en la guitarra original.

2. **La forma del cuerpo de la guitarra se asemejará a un modelo Les Paul.** Si bien esta decisión radica principalmente de un gusto personal por ese modelo de guitarra, se trata de un cuerpo de guitarra con mucha superficie maciza. Vamos a comparar rápidamente los dos modelos más famosos en guitarras eléctricas, modelo Stratocaster, y modelo Les Paul:



Figura 1.1: Comparativa de cuerpo de guitarra modelos Stratocaster (izquierda) y LesPaul (derecha) (tomado de [1][2])

Como podemos ver en la figura 1.1, el modelo Les Paul posee bastante más superficie que podemos utilizar para implementar el sistema de efectos.

3. **La activación de los efectos debe ser manual.** Para conseguir ésto simplemente se usarán *switches* de palanca para la selección de los efectos. Sin embargo, se deberá diseñar de tal forma que si no se selecciona un efecto la señal procedente de la guitarra debería llegar al amplificador sin modificación.
4. **La alimentación del sistema de efectos se encontrará en la guitarra.** Si bien los pedales suelen ir conectados a la red eléctrica, en nuestro diseño deberemos adaptarlo para que el sistema de efectos pueda ser alimentado por una batería en el interior de la guitarra.
5. **El sistema debe ser además de modular, fácilmente desmontable.** Esta filosofía va a ser de gran importancia a lo largo del proyecto. El diseño del sistema de efectos tiene que estar preparado para poderse desacoplar de la guitarra, además de resultar sencillo el cambio de cualquiera de sus partes.

## 1.3 Contexto

En este apartado se pretende exponer los conceptos básicos necesarios sobre los dos elementos fundamentales de estudio en este proyecto, las guitarras eléctricas y los pedales de efectos.

### 1.3.1 Guitarra eléctrica



Figura 1.2: Guitarra eléctrica modelo Epiphone Les Paul Studio (tomado de [3])

La guitarra eléctrica es un instrumento musical perteneciente a la familia de la cuerda pulsada, es decir, que produce sonido mediante el punteo de una cuerda, que en función de la longitud que tenga, vibrará a una frecuencia, produciendo una nota u otra (figura 1.2)

Las guitarras son instrumentos por lo general de 6 cuerdas con calibres distintos (a menor calibre, menor sección de la cuerda, mayor frecuencia de vibración y por consecuencia más agudo el sonido) en los cuales con una mano se presionará la cuerda (acortando su longitud) y con la otra se punteará, o bien con los propios dedos o bien con una púa o similar.

Si bien la guitarra fue concebida originalmente con una caja de resonancia que amplificase de manera natural la vibración de las cuerdas, la necesidad de amplificar aún más ese sonido provocó que en 1915 surgiesen las guitarras eléctricas. Estos instrumentos prescinden de una caja de resonancia, y amplifican el sonido de manera electrónica mediante unos micrófonos que captan la vibración de las cuerdas, y un sistema de amplificación (por ejemplo, un amplificador).

En los siguientes apartados vamos a exponer las partes fundamentales del instrumento.

#### 1.3.1.1 Clavijero

Parte más alta de la guitarra, y donde se afina la guitarra 1.3. La afinación de una guitarra consiste en conseguir que todas las cuerdas tengan la tensión adecuada. Ésto se consigue haciendo girar la parte más sobresaliente de las clavijas, en donde van enrolladas las cuerdas, de manera que dependiendo del sentido de giro se aumente o se reduce la tensión de la cuerda.



Figura 1.3: Clavija

### 1.3.1.2 Cejilla o cejuela

Pieza de madera, plástico u otro material (por ejemplo hueso) que se coloca al principio del diapasón 1.4. Su función es hacer de primer apoyo en las cuerdas, establecer la separación entre cuerdas y proporcionarles a éstas la altura deseada en el mástil.



Figura 1.4: Cejuela

### 1.3.1.3 Trastes

Tiras finas de metal que dividen en partes el diapasón 1.5. Establece el lugar donde se debería presionar las cuerdas para producir una nota determinada. En el caso de la guitarra, cada cambio de traste representa una subida o bajada de medio tono. El número de los mismos puede variar, pero en el caso de las guitarras eléctricas un estándar puede estar entre 19 y 22 trastes.



Figura 1.5: Trastes

### 1.3.1.4 Tensor del mástil o alma

Es una parte no visible de la guitarra 1.6. Se trata de una barra metálica introducida dentro de la pieza de madera que conforma el mástil. Dicha barra asegura que el mástil del instrumento permanezca recto, y tiene un mecanismo para hacer que se curve, de manera que se pueda ajustar si por condiciones de temperatura o deterioro de la madera el mástil se curvase.

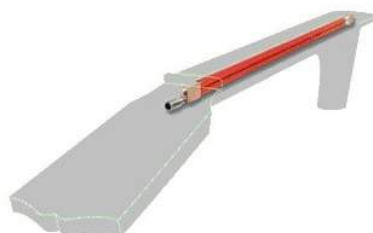


Figura 1.6: Alma

### 1.3.1.5 Diapasón

Lámina de madera que se coloca en la parte frontal del mástil [1.7](#). Es donde se presionan las cuerdas, y está separado en diferentes trastes.



Figura 1.7: Diapasón

### 1.3.1.6 Mástil

El mástil lo componen el diapasón, los trastes, el alma, la cejuela y el clavijero [1.8](#). La combinación de estas partes hacen que exista una gran variedad de mástiles:



Figura 1.8: Tipos de mástiles

### 1.3.1.7 Cuerpo

Pieza generalmente maciza de madera donde se colocan el puente, las pastillas y la electrónica de la guitarra [1.9](#). Es la parte más vistosa de la guitarra, y la que a lo largo de los años más ha caracterizado a un tipo de guitarra u otro.



Figura 1.9: Tipos de cuerpos

### 1.3.1.8 Pastillas

En este punto nos vamos a detener un poco más, ya que las pastillas son uno de los elementos más importantes en cuanto a electrónica se refiere.

En una primera aproximación, y en términos muy generales, podemos decir que las pastillas son los micrófonos de las guitarras eléctricas, es decir que captan la vibración de las cuerdas y las transforma en una señal eléctrica que se transmite a través del *jack* de la guitarra, con un funcionamiento similar a los micrófonos que se usan para amplificar la voz humana.

Ahora vamos a profundizar más en sus partes y en su funcionamiento.

Lo primero de todo es definir los tipos de pastillas que hay, que podemos generalizar en dos grupos, las *Single Coil* 1.10, y las Dobles o *Humbuckers* 1.13

- **Single Coil:** Podemos definirlas como las pastillas simples, o el diseño básico de pastilla.

Una pastilla está formada por una fila de 6 imanes cilíndricos anclados a un soporte de plástico, en el cual se enrolla un cable fino de cobre.

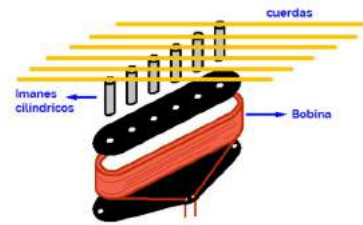


Figura 1.10: Pastillas *Single Coil* (tomado de [4])

El funcionamiento de las pastillas se basa en la ley de Faraday 1.11, la cuál relaciona la fuerza electromotriz generada en un bobinado con el número de espiras que tenga y las variaciones del campo magnético al que esté sometido:

$$\varepsilon = -N \frac{\Delta\phi}{\Delta t}$$

Figura 1.11: Ley de Faraday

En nuestro caso, al permanecer fijos tanto el bobinado como los imanes (figura 1.12), la variación del flujo magnético se producirá por la vibración de las cuerdas. En las guitarras eléctricas, al estar

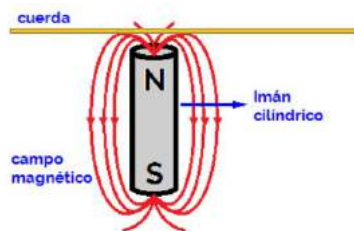


Figura 1.12: Imanes de las pastillas (tomado de [4])

hechas las cuerdas de un materia ferromagnético, la vibración de las mismas produce la variación de flujo necesaria como para que con este sistema se pueda generar una tensión eléctrica.

- **HumBuckers:** Estas pastillas fueron diseñadas debido a que con las pastillas *SingleCoil*, además de captarse las vibraciones de las cuerdas, se acoplaba un pequeño ruido producido por interferencias electromagnética. Lo que se pretendía con este tipo de pastillas, que de ahí su nombre *Hum*(ruido/zumbido) + *Bucker*(cancelador), es evitar la aparición de ese ruido indeseado.

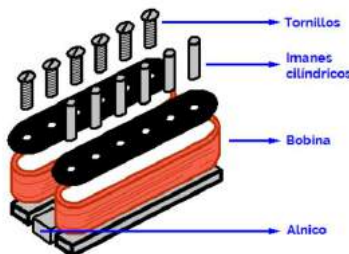


Figura 1.13: Pastillas *Humbuckers*(tomado de [4])

En esencia se tratan de configuraciones de bobinados iguales a las de las *SingleCoil*, pero polarizadas al revés, consiguiendo la eliminación de ruido que se desea.

### 1.3.1.9 Selector de pastillas y controles de volumen y tono

Agrupamos estos dos elementos ya que componen toda la electrónica de las guitarras eléctrica, y la combinación de los diferentes tipos de los mismos y la forma de conectarlos entre pueden diferenciar entre conseguir un sonido u otro en una guitarra (figura 1.14). Los selectores de pastillas son *switches* de un determinado número de posiciones que nos permiten seleccionar con qué pastilla queremos recoger la señal de las cuerdas, o incluso poder combinar dos pastillas.

Los controles de volumen y tono son potenciómetros que nos permite modificar el tono y el volumen del conjunto, o bien de una pastilla en concreto. Este elemento se incorporó en las guitarras eléctricas con el fin de que se pudiera adaptar el sonido a las condiciones que se presenten en el momento de tocar, por ejemplo el tipo de amplificador al que se conecte la guitarra.

Aunque las configuraciones de estos elementos son muy diversas, vamos a analizar la que tiene la guitarra para pruebas que se empleó en este proyecto, debido a que, como veremos más tarde, la guitarra que se ha elegido para el proyecto no dispone de selector de pastillas. La configuración en cuestión consiste en 2 pastillas dobles, con un selector de 3 posiciones, y un control de volumen y de tono para cada pastilla.

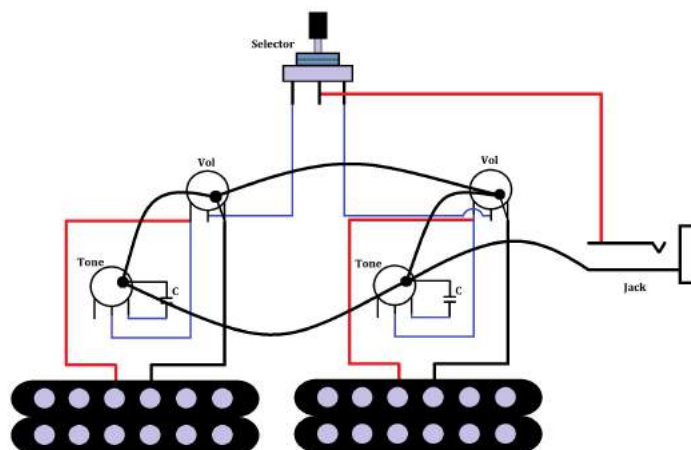


Figura 1.14: Esquema del control de tono y volumen de una guitarra eléctrica

### 1.3.2 Pedales de guitarra eléctrica



Figura 1.15: Ejemplos de pedales (tomado de [5])

Los pedales son dispositivos electrónicos diseñados para modificar las señales procedentes de instrumentos musicales eléctricos o electrónicos (figura 1.15). Comúnmente todos los pedales presentan un esquema similar al mostrado en la figura 1.16.

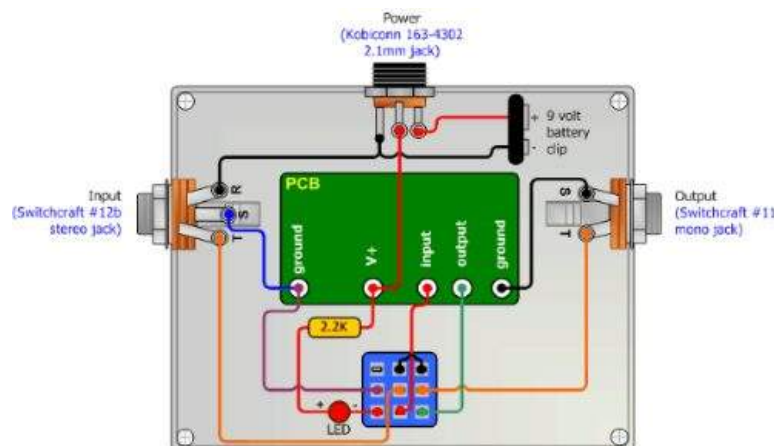


Figura 1.16: Esquema interno de un pedal (tomado de [6])

Los componentes básicos de un pedal se describen a continuación.

#### 1.3.2.1 Jack de audio estéreo 6.35mm



Figura 1.17: *Jack* de audio estéreo

Los *jacks* de audio estéreo están diseñados para transmitir dos señales con un neutro común (figura 1.17). Debido a que generalmente en los pedales se emplean señales mono, no estereo, se emplea la patilla estereo del *jack* para conectar la pila de 9V una vez esté conectado el cable al pedal. Por esta razón se utilizan este tipo de pedales en la entrada de los pedales.



### 1.3.2.2 Jack de audio Mono 6.35mm



Figura 1.18: *Jack* de audio mono

Este tipo de *jacks* se utilizan en la salida de los pedales, y solo tiene una patilla mono, ya que no es precisa la patilla estéreo, como en la entrada (figura 1.18).

### 1.3.2.3 Jack de 9V



Figura 1.19: *Jack* de alimentación de 9V

Se utiliza para alimentar la PCB del pedal. Hay dos formas de alimentar los pedales, una es con el *jack* de 9V y con una fuente de alimentación externa, y otra es con la pila que llevan incorporados los pedales (figura 1.19).

El uso de un tipo de alimentación u otro es elección del artista o del equipo técnico.

### 1.3.2.4 Interruptor 3PDT



Figura 1.20: Interruptor 3PDT

Este tipo de interruptores 3PDT (*3 Poles Double Throw*) tiene 2 posiciones con enclavamiento. Este interruptor permitirá activar mediante el pie el funcionamiento del efecto (figura 1.20).



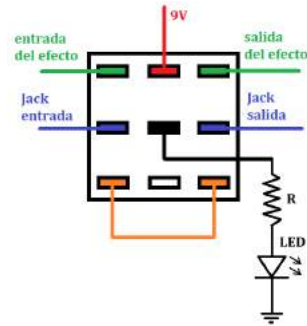


Figura 1.21: Conexiones del Interruptor 3PDT

Hay varias formas de conectar este tipo de interruptores a los circuitos de los pedales, pero se puede tomar este esquema como base:

De esta manera, cuando el interruptor está activo, la fila de pines de arriba se conectará con la del medio, de manera que la señal procedente del *jack* pasará por la PCB del efecto, y se conectará el led con la alimentación de 9V (figura 1.21). Cuando el interruptor se desactive, se hará un puente entre la entrada y la salida de los *jacks* del pedales, y el led no se encenderá.

#### 1.3.2.5 PCB

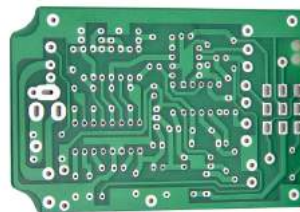


Figura 1.22: PCB

La PCB establecerá las conexiones entre los diferentes componentes electrónicos (resistencias, condensadores, integrados, etc), que serán los que modifiquen la señal procedente de la guitarra (figura 1.22). Este elemento, junto con el tipo y la calidad de los componentes electrónicos, serán los que produzcan el efecto del pedal.

#### 1.3.2.6 Potenciómetros



Figura 1.23: Potenciómetro

Serán los componentes con los que se controlen y regulen las diferentes funcionalidades y parámetros del efecto del pedal (figura 1.23).

## 1.4 Organización de la memoria

La memoria está organizada en los siguientes capítulos:

- **Capítulo 1:** Este primer capítulo sirve como introducción de todo el proyecto, explicando la idea principal del mismo y mostrando el estado y el funcionamiento básico de las tecnologías que se van a emplear.
- **Capítulo 2:** El segundo capítulo incluye toda la investigación previa al desarrollo del proyecto, las fuentes de información que se tuvieron que consultar para adquirir los conocimientos necesarios para afrontar el mismo, y las decisiones iniciales y planificación general de todo el proyecto.
- **Capítulo 3:** El tercer capítulo describe la mayor parte del trabajo del proyecto, puesto que en él se incluyen todas las explicaciones y justificaciones de los diferentes diseños electrónicos presentados, esquemáticos e imágenes que muestren su proceso de fabricación, y los diseños de las diferentes piezas fabricadas mediante la impresión 3D. Finalizará el capítulo con la integración de todas las diferentes partes en las que se divide el proyecto.
- **Capítulo 4:** El cuarto capítulo expone el presupuesto del proyecto, con un desglose de todos los materiales empleados en la fabricación del mismo. Este presupuesto nos servirá para evaluar la viabilidad económica del proyecto.
- **Capítulo 5:** Siendo el último capítulo resulta uno de los más importantes, pues incluye todas las conclusiones del proyecto, determinando si se han alcanzado los objetivos planteados y si cumple con la función y las especificaciones planificadas. Concluirá el proyecto con un apartado de líneas futuras, en el que se plantearán todas aquellas posibles mejoras para cubrir los fallos detectados, y todas las líneas de investigación y futura integración al proyecto.

## Capítulo 2

# Estudio y planificación

### 2.1 Introducción

En este capítulo se va a describir el proceso de análisis de viabilidad previo a la propuesta de proyecto, y a exponer las fuentes de información principales que se han empleado para adquirir los conocimientos necesarios para poder diseñar efectos para guitarra eléctrica.

A su vez, se concluirá con un esquema general de todo el proyecto, incluyendo una pequeña planificación del mismo.

### 2.2 Análisis previo

El objetivo en esta parte del proyecto era adquirir los conocimientos necesarios sobre el diseño y la fabricación de efectos de guitarra, que nos permitiesen emprender un diseño propio.

Para ello, primero se tuvo que hacer una búsqueda de fuentes de información fiables y que, a poder ser, nos proporcionasen las bases necesarias para poder comenzar.

La primera fuente de información fue la página web '*Tonepad*' [16]. *Tonepad* es un sitio web que proporciona toda la información necesaria para la fabricación de PCBs para efectos, además de vender los circuitos impresos específicos de cada uno.

Este sitio web fue fundamental en este proyecto, puesto que se pudo conseguir de manera sencilla un gran número de esquemáticos de efectos reales, los cuales resultaron de enorme ayuda para:

- Comprender la estructura básica que comparten, si no todos, la gran mayoría de efectos de cada tipo.
- Deducir qué partes o qué configuraciones son las diferenciadoras entre unos efectos u otros.
- Realizar un primer análisis de las diferentes partes, concluyendo la función del mayor número de componentes posibles.
- Elaborar un primer listado de materiales, ya que muchos de los componentes eran recurrentes.

Tras este primer análisis, se consiguieron los componentes necesarios para fabricar algún efecto, y así poder comprobar la viabilidad de su fabricación casera:

- Resistencia de diferentes valores.
- Condensadores de diferentes tipos (cerámicos, poliéster, electrolíticos).
- Placas perforadas de 5x7 cm.
- Amplificadores operacionales TL072, ya que se observó que era el más empleado tanto para etapas de ganancias como para filtros, como para *buffers*.
- Integrado PT2399, empleado tanto en diseño de *Delays* como en algunos de *Chorus*.
- *Headers* para PCBs de 2 y 3 vías, para las conexiones con los diferentes *Jacks* y potenciómetros.
- Potenciómetros de diferentes valores.
- *Jacks* de entrada, salida y alimentación.
- Pines hembra, para poder acoplar diferentes componentes.
- Pines para integrados, para no soldarlos directamente a la placa y facilitar su reemplazo.
- Cables de diferentes colores.

A su vez, se ha diseñado una plataforma en 3D, mostrada en la figura 2.1, para poder probar los efectos de manera sencilla y cómoda.

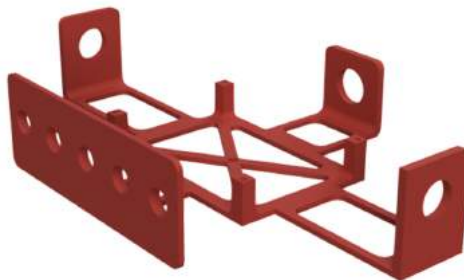


Figura 2.1: Plataforma de pruebas de efectos

Esta pieza nos permite acoplar la placa, los potenciómetros, y los jacks de audio y alimentación necesarios para poder probar el diseño de manera aislada.

Se fabricaron 2 efectos, el *Marshall Guvnor*, y el *Rebotdelay2* de Tonepad [16].

Tras probar ambos efectos con una guitarra y amplificador real se concluyó que la fabricación de pedales para guitarra con este método era factible, y que la calidad el sonido resultante era más que aceptable para el tipo de materiales empleados.

Asegurado el método de fabricación, aún quedaba profundizar más en el análisis teórico de los circuitos hasta tener la comprensión y conocimiento necesarios como para poder diseñar efectos con las características específicas que uno deseara. Para ello, además de los conocimientos adquiridos durante la formación académica, la fuente principal de información fue la página web '*Electrosmash*' [17].

Este sitio web proporciona análisis bastante aceptables de diferentes efectos, que permiten adquirir un conocimiento mucho más amplio de su funcionamiento y características. Se consideró de bastante utilidad, y ha servido tanto de fuente de información, como de inspiración para enfocar la explicación teórica de este trabajo.

En primera instancia se empezó con los efectos de distorsión, ya que poseían componentes bastante comunes, había múltiples ejemplos circuitales, y resultaba un buen punto de partida para comprender el funcionamiento de los pedales de guitarra. Se estuvieron estudiando diferentes diseños de distorsión, como por ejemplo el ya mencionado *Marshall Guvnor*, el *Boss DS-1*, el *AMZ OverDrive Pro*, el *Blues Breaker*, el conocido *Fuzz Face*, entre otros.

A pesar de que estos pedales son distintos, hay 3 partes en las que se puede separar la gran mayoría de pedales de este tipo, *buffer* de entrada/salida, etapa de ganancia y etapa de control de tono.

Tanto los *buffers* como los sistemas de ganancia se pueden conseguir de dos formas: o empleando transistores o usando amplificadores operacionales. Un factor importante en este punto es recordar que la elección de, por ejemplo, transistores u operacionales para las diferentes partes es fundamentalmente subjetiva, ya que funcionalmente son similares.

Siendo cierto que cada uno presenta sus ventajas e inconveniente, las dos opciones son igualmente válidas para estas aplicaciones, simplemente que dependiendo de cómo se conecten se conseguirá un sonido u otro (figura 2.2). Existen efectos que usan sólo transistores para ambas partes, otros que usan sólo operacionales, y otros que usan una combinación de ambos, y todas son soluciones válidas.

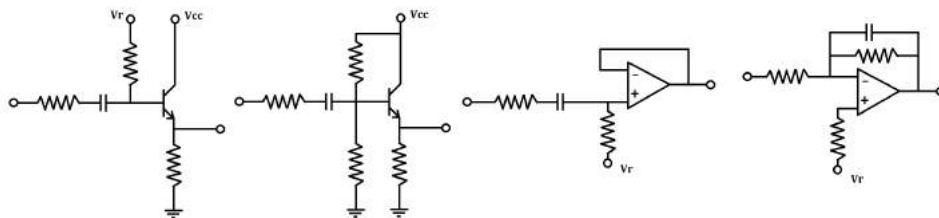


Figura 2.2: Ejemplos de circuitos de *buffers*

En cuanto al control de tono, concluimos que son circuitos con resistencias, condensadores y potenciómetros, muy similares a los que incorporan las propias guitarras. En esta parte las posibles combinaciones son infinitas, pues dependiendo del número de potenciómetros, la conexiones de los diferentes componentes y los valores de los mismos, se consigue un control de tono u otro (figura 2.3).

Debido a la gran cantidad de posibilidades, se tomó la decisión de tomar algún diseño ya existente, que presentase las características que se quisiesen, e ir variando sus valores hasta conseguir un control de tono adecuado a lo que se busque.

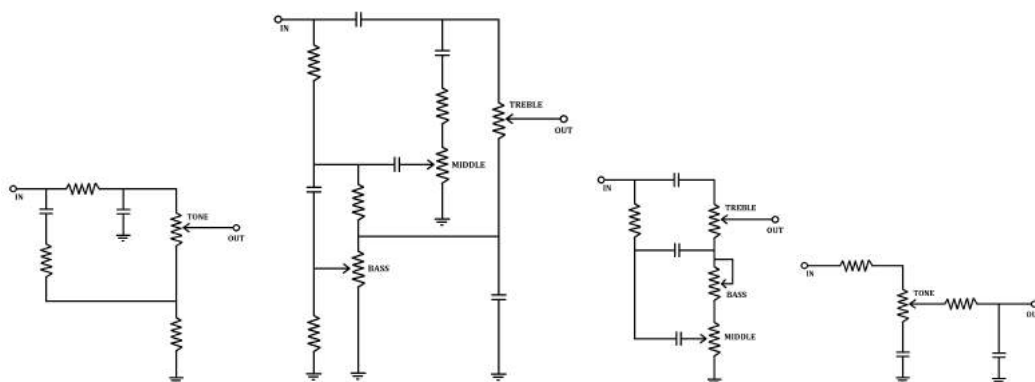


Figura 2.3: Ejemplos de circuitos de control de tono.

Como podemos observar existen controles de tono más simples, más complejos, con más controles, con menos, pero todos cumplen la misma función.

## 2.3 Planteamiento

### 2.3.1 Elección de la cantidad y el tipo de efectos

Uno de los objetivos de este proyecto es, además que los efectos se encuentren incorporados en el cuerpo de la guitarra eléctrica, que estos permitan conseguir con su combinación el mayor abanico posible de sonidos. Para ello, debemos en primer lugar investigar qué combinación de pedales son las más empleadas, para entonces poder determinar el tipo y la cantidad de efectos que incorporaremos a nuestro diseño.

#### 2.3.1.1 Distorsionador

El primer efecto que deberemos buscar tendría que ser uno que distorsione la señal de la guitarra. Este tipo de efectos se usan en la gran mayoría de géneros en los que se emplean guitarras eléctricas, puesto que proporcionan una gran saturación de la señal y un sonido que puede ser desde potente pero claro, hasta muy estridente y “afilado”.

Existen una gran cantidad de efectos que distorsionan la señal de la guitarra, pero vamos a clasificarlos en los siguientes 3 grupos (figura 2.4):

- **Distorsión:**

De los 3 es el que distorsiona de manera más agresiva la señal, con un recorte muy característico y produciendo ciertos picos en la señal final.

- **Overdrive:**

Su objetivo es emular la forma natural de saturación de una señal, produciendo un recorte más uniforme en la señal final.

- **Fuzz:**

El principio es muy similar al del *Overdrive*, sin embargo se eleva tanto la ganancia antes del recorte que el resultado se asemeja a una señal cuadrada.

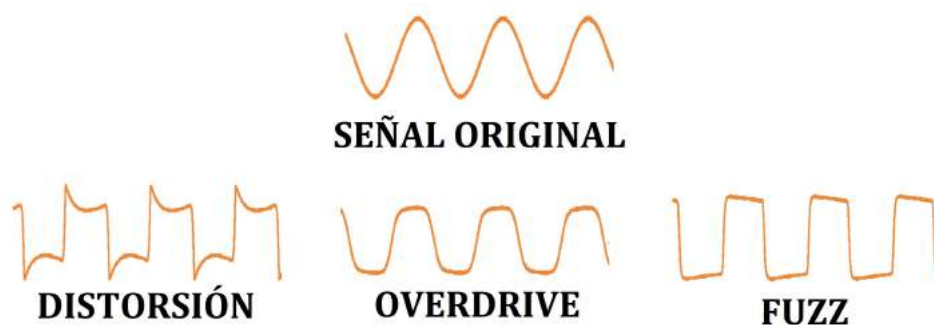


Figura 2.4: Comparación de los distintos efectos de distorsión (tomado de [7])

Se puede apreciar que la Distorsión tiene un recorte mucho más agresivo que el resto, y que la ganancia que proporciona el *Fuzz* es superior al resto, consiguiendo una señal casi cuadrada.

Ninguno de estos efectos es mejor o peor, sólo producirán un sonido u otro, por lo que ya se profundizará en qué características de estos efectos se emplearán para diseñar nuestro efecto de distorsión y conseguir un sonido que nos agrade.

### 2.3.1.2 Retardo

El segundo efecto que se buscará será el de retardo. El efecto de retardo consiste en la multiplicación y retraso modulado de una señal sonora, que se mezcla con la señal original y se produce el efecto de eco sonoro (figura 2.5)

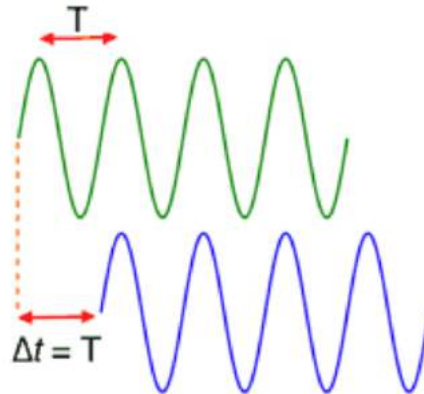


Figura 2.5: Representación del efecto de *delay* (tomado de [8])

Existen principalmente dos tipos de efectos de *delay*, los analógicos y los digitales.

Los *delays* analógicos suelen funcionar con integrados tipo BBD (*Bucket-brigade device*) que transmite una señal analógica través de una serie de resistencias en cada ciclo de reloj. Los retardos de los *delays* analógicos son más cortos que los de los digitales debido a las limitaciones de los BBD.

Los *delays* digitales emplean procesadores DSP (*Digital Signal Processor*), de manera que se puede configurar tanto cómo es el retardo (colorido, translúcido, etc), como la duración de los mismos. A menudo suele ser la calidad de los sistemas de conversión ADC y DAC que tengan estos efectos lo que determinan lo efectivos que sean.

## 2.3.2 Elección de la guitarra

Este es un apartado muy importante en el proyecto, puesto que las características de la guitarra que se elija van a determinar por completo la estructura del proyecto, la distribución interna de sus componentes, etc.

En primera instancia, se planteó adquirir una guitarra convencional, y recortar parte de su cuerpo para poder encajar el sistema de efectos (figura 2.6)

Esto podría conllevar los siguientes problemas:

1. El corte debe de estudiarse muy bien, puesto que aunque no se ven, las guitarras suelen tener canales internos por los que pasan los cables, y recortar por accidente uno de estos canales podría causar problemas.
2. El corte que se hiciese no sería limpio, ya que no se dispondría de herramientas profesionales para hacer el corte.
3. Se perdería la filosofía modular o de encaje. Desde un primer inicio, un requisito para el proyecto era el modificar en la menor medida de lo posible la guitarra que se eligiera, de manera que se pudiese usar con o sin el sistema implementado. Además, para que el instrumento conservase cierta estética, el sistema se debería adaptar perfectamente a la forma de la guitarra original, para que no desentonarse una vez integrado.

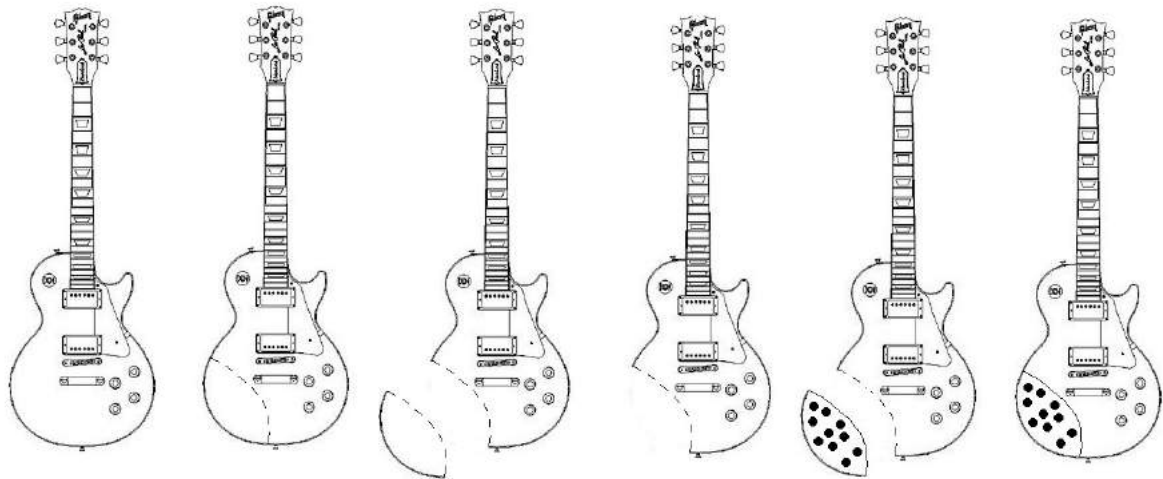


Figura 2.6: Recorte de una guitarra eléctrica convencional

Descartada la idea de recortar el cuerpo de una guitarra se procedió a hacer una segunda búsqueda, pero esta vez de una guitarra de un tamaño reducido.

El planteamiento sería encontrar un modelo de guitarra lo suficientemente pequeño como para poder añadir una carcasa con el sistema de efectos, pero sin modificar nada de la guitarra original.

Tras un tiempo de búsqueda, se encontró el modelo perfecto (figura 2.7)



Figura 2.7: Guitarra *Hofner* modelo *Shorty* (tomado de [9])

Se trata de una guitarra de la marca *Hofner*, modelo *Shorty*. Este modelo se popularizó por venderse como guitarra de viaje, ya que debido su reducido tamaño se puede transportar de manera más sencilla que una convencional.

Este modelo resulta ideal para el proyecto, puesto que incluye todos los componentes básicos de una guitarra eléctrica convencional, pero con el tamaño reducido que buscábamos para añadir nuestro sistema, y permitiendo una gran libertad en cuanto a su diseño y forma.

Adicionalmente, tras analizar reseñas de este modelo, se destaca el problema que tiene a la hora de tocarlo, debido a su tamaño reducido.

Si se toca el instrumento sentado, es muy incómodo porque no tiene los apoyos suficientes, y si se toca de pie y con una correa, al pesar más el mástil que el cuerpo, el centro de gravedad está muy desplazado hacia la zona del diapasón con lo que se vence hacia ese lado.



Esto provoca que la persona que esté tocando el instrumento agarra el mismo a la vez que lo toca, lo cual no es práctico en absoluto. Una solución que se propone para este problema es añadirle peso externamente al cuerpo para nivelar el instrumento, aunque el resultado puede no ser el esperado, porque la compensación puede no ser tan homogénea, y a nivel estético no resulta especialmente atractivo.

Con la carcasa que se quiere implementar, se solucionaría este problema, ya que una vez integrados todos los componentes electrónicos en ella, se le podría añadir el peso que se quisiera o fabricarla de un material con mayor o menor densidad para conseguir esa nivelación.

En cuanto a las prestaciones electrónicas, es un modelo muy simple, con una pastilla doble (que nos proporciona una señal más amplia que una simple), un control de tono y un control de volumen, elementos más que suficientes para el proyecto.

Al ser una guitarra muy compacta, no sería necesario modificar nada ni de la forma ni de la electrónica, pues que la carcasa iría enganchada a la guitarra, y se tomaría el *jack* de salida de la guitarra como entrada de nuestro sistema.

## 2.4 Esquema general del proyecto

En este apartado se pretende plantear un esquema general de todas las partes que compondrían el proyecto, y que sirva de punto de partida para la planificación y desarrollo del mismo.

### 2.4.1 Efectos

Como ya hemos comentado anteriormente, para el diseño de cada uno de los efectos deberemos seguir los siguientes pasos:

1. División del efecto en bloques.
2. Definición de las especificaciones para cada bloque.
3. Cálculo de los parámetros de cada bloque.
4. Simulación de cada bloque.
5. Planteamiento del circuito completo del efecto.
6. Prueba del circuito en placa *protoboard*.
7. Diseño de pistas para placa perforada.
8. Fabricación del efecto en placa perforada.
9. Comprobación del funcionamiento del efecto.

Inicialmente se va a seguir este esquema para los efectos de *Distorsion* y *Delay*, aunque el sistema permitiría incorporar hasta 4 efectos.

### 2.4.2 Alimentación

A continuación se tendrá que diseñar un sistema de alimentación, ya que un requerimiento para el sistema de efectos es que no dependiera de una conexión a la red eléctrica. Para el diseño del sistema de alimentación se seguirán los siguientes pasos:

1. Definición de las especificaciones del circuito.
2. Planteamiento del circuito de alimentación.
3. Prueba del circuito en placa *protoboard*.
4. Diseño de pistas para placa perforada.
5. Fabricación del sistema de alimentación en placa perforada.
6. Comprobación del funcionamiento del sistema de alimentación.

### 2.4.3 Selección

El siguiente paso sería diseñar un sistema de selección, pues el sistema de efecto tiene que dar la posibilidad de activar o desactivar los diferentes efectos independientemente. Para el diseño del sistema de selección se seguirán los siguientes pasos:

1. Definición de las especificaciones para la selección de 1 efecto.
2. Diseño del sistema de selección para 1 efecto.
3. Prueba del sistema de selección para 1 efecto en placa *protoboard*.
4. Diseño del sistema de selección para 4 efectos.
5. Prueba del sistema de selección para 4 efectos en placa *protoboard*.
6. Diseño de pistas para placa perforada.
7. Fabricación del sistema de selección en placa perforada.
8. Comprobación del funcionamiento del sistema de selección.

### 2.4.4 Carcasa

Una vez se tenga toda la parte electrónica del proyecto, se deberá fabricar la carcasa que irá acoplada a la guitarra eléctrica, y que tendrá que permitir acoplar todas las diferentes partes del circuito electrónico. Para el diseño de la carcasa, se seguirán los siguientes pasos:

1. División de la carcasa en diferentes piezas.
2. Definición de las especificaciones para cada una de las piezas.
3. Diseño en 3D de los componentes que haya que acoplar en cada pieza.
4. Diseño de cada pieza de la carcasa.
5. Impresión de cada pieza, para verificar que el diseño es correcto.
6. Montaje de toda la carcasa.

## Capítulo 3

# Diseño y fabricación

### 3.1 Introducción

En este capítulo se incluirán:

- Consideraciones inicial y requisitos necesarios
- Diagramas y esquemas a modo de mapa visual del resultado que se pretende conseguir
- Cálculos matemáticos para determinar los parámetros y componentes necesarios
- Simulaciones para validar las diferentes partes
- Esquemas y listado de componentes
- Fabricación de las diferentes partes
- Conclusiones finales una vez fabricadas las diferentes partes

Y que serán referentes al diseño y a la fabricación de los siguientes elementos:

1. Efecto de distorsión
2. Efecto de *delay*/retardo
3. Placa de alimentación
4. Placa de selección
5. Carcasa

El objetivo será exponer el proceso llevado a cabo hasta obtener el resultado final, incluyendo la justificación de las diferentes decisiones que se han tomado y de las modificaciones que se han hecho con respecto a la planificación inicial.

## 3.2 Efecto de distorsión

### 3.2.1 Introducción

En este apartado se pretende exponer el origen de los efectos de distorsión, y cómo fue la transición de un efecto natural indeseado en el tratamiento de señales al posiblemente recurso más empleado en la guitarra eléctrica.

El origen de los efectos de distorsión se produjo, como en muchos otros inventos a lo largo de la historia, por un accidente. Si bien no se puede afirmar cuál fue el punto de partida de este efecto musical, vamos a mencionar brevemente el que es considerado por muchos el origen de la distorsión, que se remonta a comienzos de la década de los 60s, más concretamente al año 1961.

Uno de los mayores referentes del *country* en esos momentos, *Marty Robbins*, estaba grabando con el guitarrista de sesión *Grady Martin* el single “*Don’t Worry*”. El sistema de amplificación que usaba *Grady Martin* presentó ese día un fallo crítico, provocando que el sonido de este guitarrista saliese distorsionada y “sucio”.

Los técnicos de sonido se dieron cuenta de este fallo a mitad de grabación, sin embargo, quedaron tan fascinados por el sonido que estaba produciendo ese amplificador, que indicaron a los artistas que continuaran con la grabación. Finalmente publicaron el single con esa guitarra distorsionada, aún sabiendo que en esa época el sonido distorsionada produciría rechazo al público.

Ese sonido de guitarra fue una revolución, y muchos artistas de la época hasta pedían grabar en el mismo estudio en el que se grabó “*Don’t Worry*” para añadir a sus canciones ese amplificador, que recordemos presentaba fallo.

Sin embargo esto no pasó, puesto que poco tiempo después de la grabación de “*Don’t Worry*”, el amplificador que había reinventado la guitarra eléctrica había dejado de funcionar por completo.

Desde ese momento, ingenieros de la época se pusieron manos a la obra para crear o modificar sistemas de amplificación ya existentes que replicasen esa distorsión, llegando a romper a propósito amplificadores para provocar su fallo, y que produjesen un sonido distorsionado.

Tras un tiempo, y una metodología de prueba y error, se presentó la primera patente de “pedal de distorsión”, el **Master FZ-1 Fuzz-Tones** (figura 3.1), que además de emular ese fallo de amplificación, permitía a los artistas su activación en momentos concretos de las canciones.



Figura 3.1: Pedal Gibson Maestro Fuzz Tone 1 (tomado de [10])

En los siguientes apartados se describirán los diferentes elementos de diseño que hay que considerar en relación a este efecto.

### 3.2.2 Buffer de entrada

Éste primer elemento es empleado de manera recurrente en los pedales de guitarra, ya sea un distorsionador o cualquier otro tipo de efecto, habiendo incluso pedales exclusivos que contienen *buffers*. Esta será la primera etapa del diseño (figura 3.2).

En este tipo de sistemas, el principal objetivo de los *buffers* es proporcionar al sistema un porcentaje muy elevado de la señal de tensión que proviene de la guitarra. Esto se conseguirá aumentando considerablemente la impedancia de entrada del sistema, para evitar que cargue eléctricamente a las etapas de salida a las que se conecta.

La impedancia de salida de una guitarra eléctrica depende de varios factores, sobre todo de las pastillas que se usen en la misma, pero suele rondar en torno a los  $5k\Omega - 15k\Omega$ . Con esta información, pongamos un ejemplo para aclarar la función del *buffer*. Supongamos que la guitarra que se va a emplear tiene una impedancia de salida de  $10k\Omega$ , y que el pedal que se conecta directamente a esa guitarra (sin *buffer*) también esa misma impedancia de entrada, es decir,  $10k\Omega$ . Esto supondría que la amplitud de la tensión que aparecería en la entrada del circuito del efecto sería la mitad de la que saliese de la guitarra, puesto que las impedancias de salida y entrada de la guitarra y el efecto respectivamente formarían un divisor de tensión. Esto puede suponer que si por ejemplo el efecto se configura con una ganancia de 10, la real sería de 5.

Ahora supongamos que se coloca un *buffer* entre la guitarra y el efecto, y que dicho *buffer* proporciona una impedancia al sistema elevada, por ejemplo  $1M\Omega$ , que es un valor recomendable en este tipo de aplicaciones. Con esta configuración, se consigue que la atenuación es prácticamente despreciable, con lo que la tensión de entrada al circuito del efecto sería casi idéntica a la de salida de la guitarra, una mejora considerable con respecto a la situación anterior.

Hay dos formas principales de diseñar un *buffer* de entrada para este tipo de sistemas, una con operacionales, y otra con transistores. Generalmente en efectos de distorsión se suele emplear transistores para diseñar esta primera etapa, pero se podría emplear perfectamente un operacional en sustitución a los transistores, sin embargo en este trabajo optaremos por un diseño con transistores.

El diseño del *buffer* de entrada se basará en un circuito muy utilizado que emplea un transistor NPN en configuración de seguidor de emisor, o también conocido como colector común. Se añadirá también un filtro para eliminar cualquier componente continua que pueda dañar la guitarra, y frecuencias inaudibles por el ser humano, es decir, por debajo de  $20 - 30Hz$ .

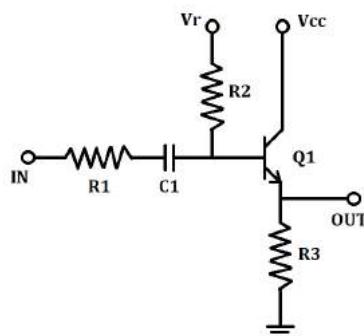


Figura 3.2: Esquema del *buffer* de entrada del efecto de distorsión

El objetivo final de este circuito será aportar una impedancia de entrada de alrededor de  $1M\Omega$ , y que la salida siga a la entrada. Vamos a proceder a analizar el circuito, tanto en CC como en CA, para comprobar cómo esta configuración proporciona los requisitos deseados.

### 3.2.2.1 Análisis en CC

Lo primero que tendremos que hacer es polarizar el transistor para garantizar su funcionamiento en todo el rango de la señal de entrada (figura 3.3). Para que un transistor funcione, la tensión de la base debe ser superior a la tensión  $V_{BE}$ , por lo que añadiremos una tensión de referencia  $V_r$  conectada a la base.

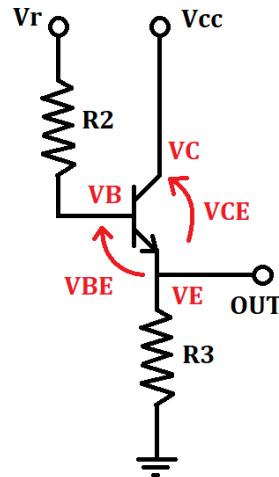


Figura 3.3: Esquema del *buffer* de entrada distorsión en CC

La polarización va a provocar que en la salida tengamos una componente continua de valor  $V_r - V_{BE}$ , y además deberemos elegir un valor que nos garantice que para cualquier valor de la señal de entrada (alterna), la tensión de la base siga siendo superior a  $V_{BE}$  (figura 3.4). Un valor aceptable podría ser  $4,5V$ , que se empleará también como referencia en sistemas posteriores. De esta manera la tensión de salida tendrá un buen rango de actuación que ni se acerque demasiado a  $0V$  ni se acerque al valor de la alimentación de  $9V$ .

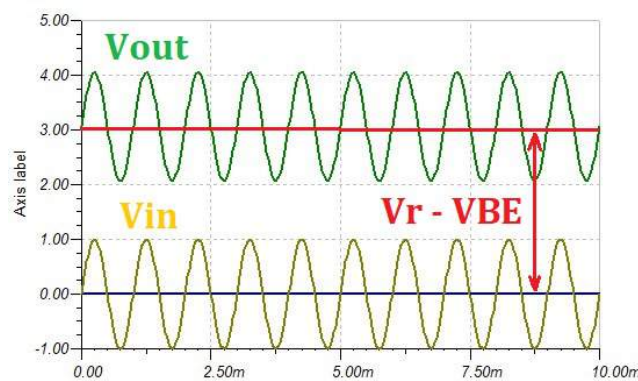


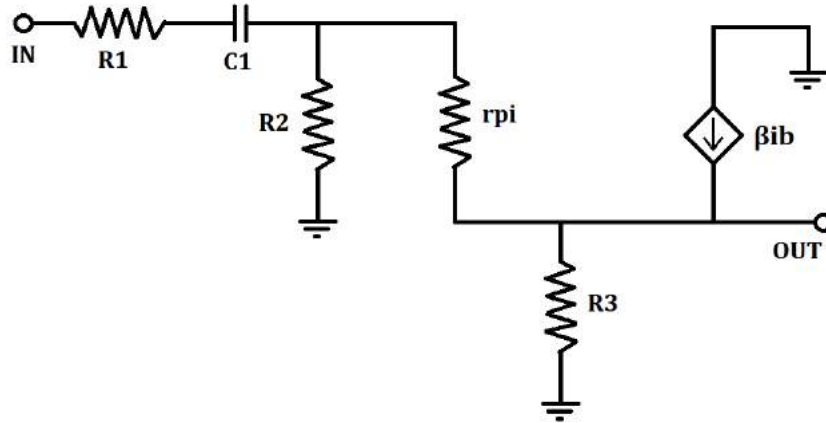
Figura 3.4: Polarización del *buffer* de entrada del efecto de distorsión

La resistencia  $R_2$  tendrá la función de limitar la corriente que pueda circular, por lo que tendrá que tener un valor alto, que posteriormente veremos que dicho valor influirá sensiblemente en el valor de la impedancia de entrada.

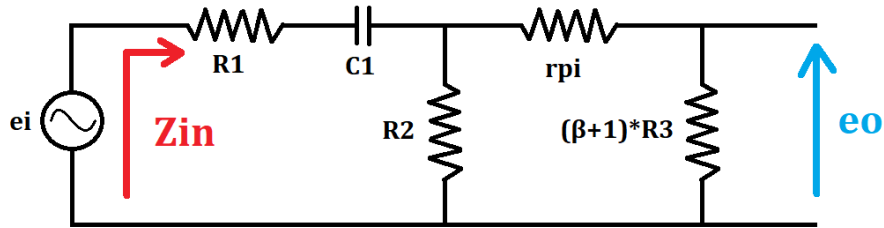
La resistencia  $R_3$  se emplea como resistencia de emisor, siendo un valor muy utilizado en esta configuración  $10k\Omega$ , así que tomaremos este valor de referencia.

$R_3 = 10k\Omega$

## 3.2.2.2 Análisis en CA

Figura 3.5: Esquema equivalente en CA del *buffer* de entrada del efecto de distorsión

Simplificando el circuito equivalente de la figura 3.5) nos quedaría el de la figura 3.6.

Figura 3.6: Esquema equivalente en CA (simplificado) del *buffer* de entrada del efecto de distorsión

Si analizamos la impedancia de entrada de la figura 3.6, nos quedaría:

$$Z_{in} = R1 + [R2 || (r_{pi} + (\beta + 1) \cdot R3)] \quad (3.1)$$

**Consideraciones:**

- $r_{pi}$  tiene un valor relativamente pequeño, y al usar un transistor con alta ganancia,  $(\beta + 1) \cdot R3$  tendrá un valor muy grande, por lo que al hacer el paralelo con  $R2$  su valor se podría despreciar.
- $R1$  sirve para proteger a la base del transistor de sobrecorrientes. Debido a que la señal de entrada tendrá valores en el rango de los mVpp, nos servirá una  $R1$  con valores de pocos  $k\Omega$ .

$$R1 = 1k\Omega$$

Teniendo en cuenta que  $R2$  tiene que tener un valor grande, podemos despreciar el valor de  $R1$  de la conexión en serie. Nos queda entonces que:

$$Z_{in} = R2 \geq 1M\Omega$$

### 3.2.2.3 Análisis en frecuencia

Como ya hemos visto anteriormente, los valores de  $r_{pi}$  y  $(\beta + 1) \cdot R3$  podemos despreciarlos en esta configuración, por lo que el circuito nos queda como en la figura 3.7.

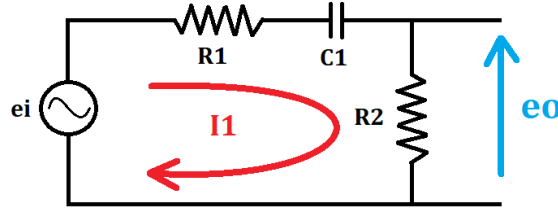


Figura 3.7: Análisis en frecuencia del *buffer* de entrada del efecto de distorsión

Analizamos temporalmente el circuito:

$$(R1 + R2) \cdot i(t) + \frac{1}{C1} \cdot \int_0^t i(t) dt = ei(t) \quad (3.2)$$

En régimen de Laplace:

$$(R1 + R2) \cdot I(s) + \frac{1}{C1 \cdot s} \cdot I(s) = Ei(s) \quad (3.3)$$

Multiplicamos por “s” para no tenerla en el denominador:

$$(R1 + R2) \cdot I(s)s + \frac{1}{C1} \cdot I(s) = Ei(s) \cdot s \quad (3.4)$$

Despejando la  $I(s)$  nos queda:

$$I(s) = \frac{Ei(s) \cdot s}{(R1 + R2) \cdot I(s) \cdot s + \frac{1}{C1}} \quad (3.5)$$

Poniendo la tensión de salida en función de  $I(s)$ :

$$Eo(s) = R2 \cdot I(s) = \frac{R2 \cdot Ei(s) \cdot s}{(R1 + R2) \cdot I(s) \cdot s + \frac{1}{C1}} \quad (3.6)$$

La función de transferencia será por tanto:

$$\frac{Eo(s)}{Ei(s)} = \frac{R2 \cdot s}{(R1 + R2) \cdot I(s) \cdot s + \frac{1}{C1}} = \frac{R2}{R1 + R2} \cdot \frac{s}{s + \frac{1}{C1 \cdot (R1 + R2)}} = \frac{Eo(s)}{Ei(s)} \quad (3.7)$$

Debido a que  $R2 \gg R1$ , tendremos ganancia unitaria para frecuencias medias/altas:

$$\frac{R2}{R1 + R2} = 1(\text{aprox}) \quad (3.8)$$

Para conseguir eliminar frecuencias inaudibles y ruidos indeseados, tendremos que tener una frecuencia de corte de pocos Hz. Un rango bueno sería entre  $5Hz$  y  $15Hz$ . Considerando que  $R2 = 1M\Omega$ , tendremos el siguiente rango de valores para el condensador  $C1$ :

$$C1 = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot R2} \quad (3.9)$$



Sustituyendo en el rango de la ecuación 3.9:

$$C1 = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 5 \cdot 10^6 \Omega} = 31,8nF \quad (3.10)$$

$$C1 = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 15 \cdot 10^6 \Omega} = 10,6nF \quad (3.11)$$

$$31.8nF < C1 < 10.6nF \quad (3.12)$$

Estableciendo un valor estándar:

$$C1 = 33nF$$

### 3.2.2.4 Simulaciones

Para verificar el correcto diseño del *buffer* de entrada, se ha procedido a simular el circuito de la figura 3.8.

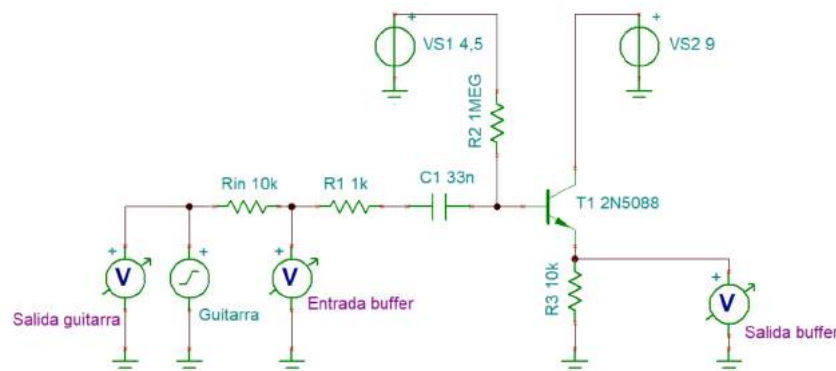


Figura 3.8: Circuito de la simulación del *buffer* de entrada del efecto de distorsión

Se ha considerado que la guitarra empleada en la práctica (figura 2.7) presenta una impedancia de salida de  $10k\Omega$ , y que genera una señal sinusoidal de  $1kHz$ . Para comprobar que efectivamente se consigue un incremento significativo en la impedancia de entrada del circuito, aislaremos solo la parte del *buffer*, y conectaremos un óhmetro, con el resultado de la figura 3.9.

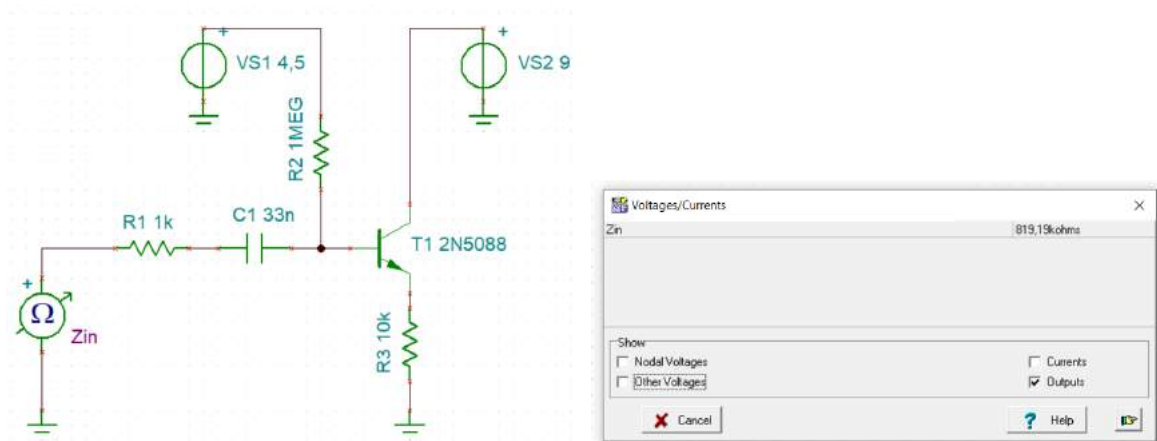


Figura 3.9: Impedancia de entrada de *buffer* de entrada del efecto de distorsión

Podemos observar que, aunque no obtenemos exactamente el valor previsto para  $R_2$ , conseguimos una impedancia de entrada bastante elevada (figura 3.9). La diferencia con el valor supuesto teórico se debe a las simplificaciones teóricas asumidas (ecuación 3.1).

Ahora, para apreciar el efecto de la impedancia del *buffer*, se ha simulado el comportamiento de la señal de entrada (guitarra), con la salida del *buffer*, para distintos valores de  $R_2$ , como se muestra en la figura 3.10.

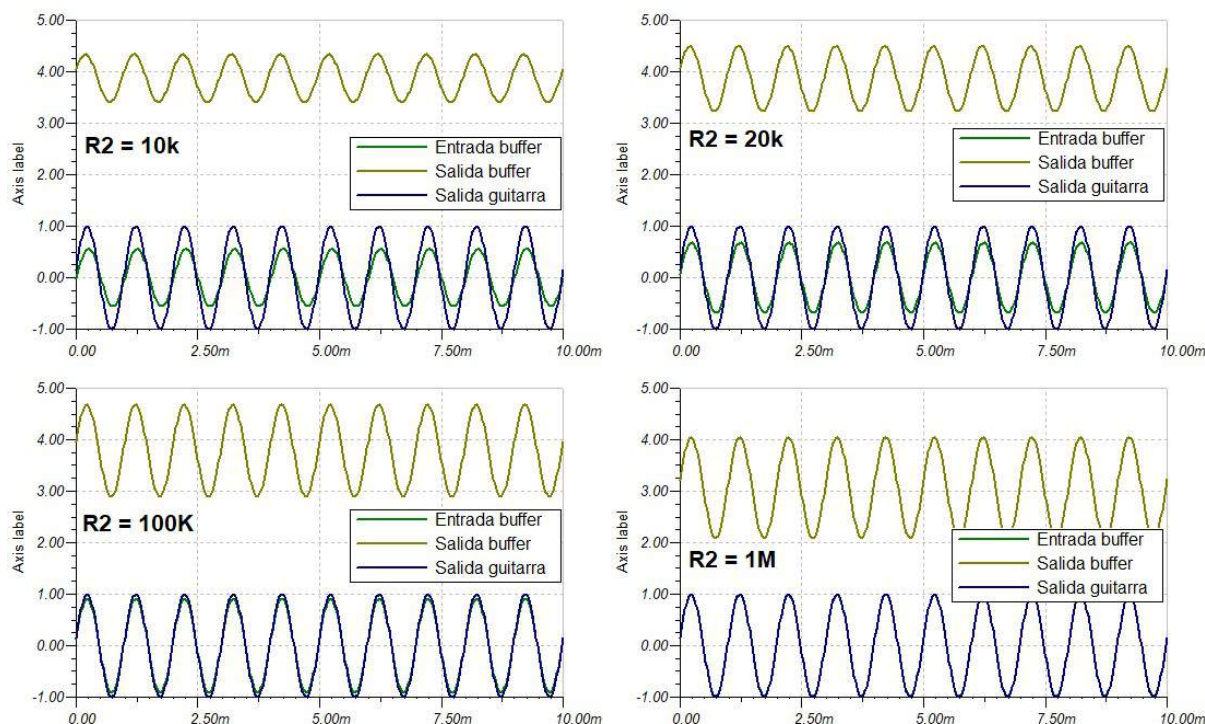


Figura 3.10: Comportamiento del *buffer* de entrada distorsión en función de  $R_2$

Podemos sacar dos conclusiones fundamentales:

- **A medida que la resistencia  $R_2$  aumenta, tanto la señal de entrada como de salida del *buffer* se asemejan más a la de salida de la guitarra.** Esto se debe que  $R_2$  afecta tanto para el cálculo de la impedancia de entrada como para la ganancia del *buffer*.
- **Para valores elevados de  $R_2$ , la componente continua de la señal de salida del *buffer* será más pequeña.** Esto se debe a que, en el circuito, la corriente que circula por la base del transistor alcanza valores entre  $800 - 1000nA$ .

Aunque siendo un valor muy pequeño, si  $R_2$  es del orden de los  $M\Omega$ , la caída de tensión en  $R_2$  no podría ser despreciable, provocando, por ejemplo, en el caso de  $R_2 = 1M\Omega$ , que fuese de alrededor de  $1V$ , resultando una componente continua de  $V_r - V_{BE} - V_{R2} \approx 3V$  (figura 3.4).

En el resto de casos, esa caída de tensión puede ser del orden de los  $mV$ , con lo que se podría despreciar.

Finalmente, se ha simulado el comportamiento en frecuencia del circuito, para comprobar que el filtro paso alto compuesto por  $R_2$  (considerando que tiene un valor de  $1M\Omega$ ),  $R_1$  y  $C_1$ , cumple los requisitos establecidos.

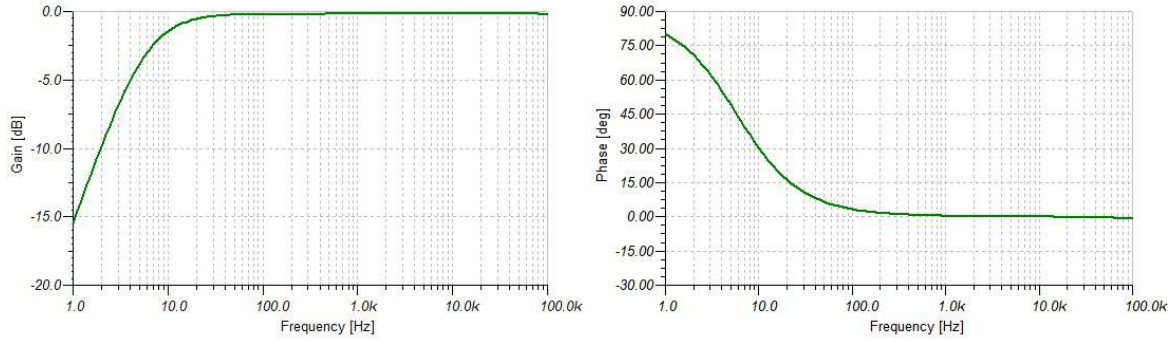


Figura 3.11: Diagrama de Bode del *buffer* de entrada del efecto de distorsión

Podemos comprobar que el funcionamiento es el correcto, y de acuerdo a la función de transferencia (ecuación 3.7). De los diagramas de la figura (figura 3.11) podemos observar cómo se tiene un filtro paso alto que presenta:

- Un cero en  $0Hz$ .
- Un polo en  $\frac{1}{2 \cdot \pi \cdot C1 \cdot (R1 + R2)} = 4,8Hz$ .
- Una pendiente de  $20dB/dec$ .
- Un desfase de  $90^\circ$  en el cero, y un desfase de  $0^\circ$  en el polo.
- Una ganancia de  $0dB$  en el ancho de banda.

### 3.2.2.5 Especificaciones del diseño

Componente	Valor/Tipo
R1	$1k\Omega$
R2	$1M\Omega$
R3	$10k\Omega$
C1	$33nF$
Q1	2N5088

Tabla 3.1: Parámetros del *buffer* de entrada del efecto de distorsión

### 3.2.3 Etapa de ganancia

El efecto de distorsión se consigue aumentando la ganancia de la señal de la guitarra y recortándola para emular la saturación que se producía en los amplificadores de válvulas.

La distinción de la mayor parte de los pedales de distorsión reside en esto, en cuánta ganancia se le aplica a la señal de entrada, y a qué nivel y cómo se recorta. Para nuestro diseño hemos optado por hacer el recorte con diodos, ya que en algunos casos se emplea la propia saturación de los amplificadores operacionales o los transistores para realizarlo, a coste de perder control sobre el mismo.

La opción inicial será usar diodos **1N914**, que presentan una  $V_f = 1V$ , que nos proporcionará un punto medio entre los recortes de algunos pedales como el **BOSS-DS1** (0,7V), y el recorte del **Marshall Guvnor** (Led rojos, 1,2–1,5V). Como regla general, las guitarras eléctricas proporcionan señales alternas de valor de 60a200mVp (pastillas sencillas) y de 200a600mVpp (*humbuckers* y pastillas calientes).

Esta diferencia no va a resultar un problema, sólo que para guitarras con pastillas sencillas costará más obtener una distorsión fuerte, mientras que en las *humbucker* habrá que controlar más la distorsión puesto que se recortarán con mayor facilidad. Para el diseño se considerará una tensión base de la guitarra de **100 mVpp**.

La cantidad de ganancia de un pedal de distorsión no tiene un valor determinado, hay pedales con más ganancia y recortes más duros, otros con recortes más suaves, otros con etapas de preganancias para que la saturación se produzca antes, etc. Un primer planteamiento podría ser diseñar dos etapas de ganancia, aprovechando que el integrado **TL092** nos proporciona 2 amplificadores operacionales (figura 3.12).

En una primera etapa, se le proporcionará a la señal una ganancia suficiente como para que ésta se recorte, aunque muy levemente, y en una segunda etapa, que será la que el usuario pueda modificar, se irá disminuyendo el tiempo que tarde la señal en saturar, es decir, se aumentará aún más la ganancia para que la señal crezca más rápidamente.

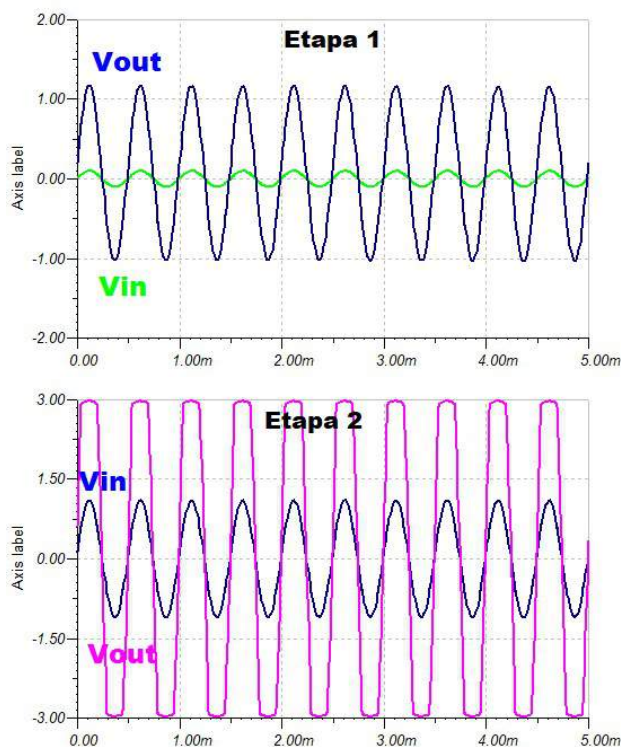


Figura 3.12: Etapas de ganancia del efecto de distorsión

## 3.2.3.1 Primera etapa

El circuito de la primera etapa de ganancia sería el mostrado en la figura 3.13.

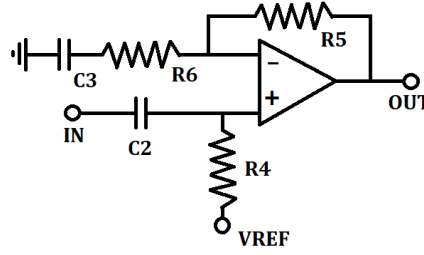


Figura 3.13: Primera etapa de ganancia del efecto de distorsión.

## Consideraciones del diseño:

1. El amplificador está en una configuración no inversor para no desfazar la señal de entrada con respecto a la salida
2. Tomando como base una tensión de entrada de  $100mV_{pp}$ , si deseamos llegar al límite de saturación, necesitaremos que la primera etapa presente una ganancia de al menos 10:

$$V_{out} = V_m \cdot \left(1 + \frac{R5}{R6}\right) \rightarrow \frac{R5}{R6} \geq 9 \quad (3.13)$$

Consideramos, por ejemplo:

$$R5 = 100k\Omega$$

$$R6 = 10k\Omega$$

3. R4 se emplea para polarizar la patilla (+) y crear una masa virtual, por lo tanto necesitaremos un valor grande, del orden de los  $k\Omega$ , o si es posible de  $1M\Omega$ . Consideramos, por ejemplo:

$$R4 = 1M\Omega$$

4. La polarización de la patilla (+) del operacional se realiza debido a que la alimentación de la que dispondremos es asimétrica, lo que conlleva que el operacional soportará voltajes en el rango  $(9v0v)$  (figura 3.14). Esto es importante debido a que la señal de entrada del operacional será alterna, con lo que la polarización es necesaria para protegerle de voltajes negativos. Utilizaremos nuestra tensión de referencia de todo el sistema de  $4,5V$ :
5. Analizamos la función de transferencia en frecuencia:

$$\begin{aligned} \frac{V_{out}}{V_{in}} &= \left( \frac{R4}{R4 + \frac{1}{C2 \cdot s}} \right) \cdot \left( 1 + \frac{R5}{R6 + \frac{1}{C3 \cdot s}} \right) = \left( \frac{R4}{R4 + \frac{1}{C2 \cdot s}} + \frac{R4 \cdot R5}{(R4 + \frac{1}{C2 \cdot s}) \cdot (R6 + \frac{1}{C3 \cdot s})} \right) = \\ &= \left( \frac{R4 \cdot R6 + \frac{R4}{C3 \cdot s} + R4 \cdot R5}{(R4 + \frac{1}{C2 \cdot s}) \cdot (R6 + \frac{1}{C3 \cdot s})} \right) = \frac{R4 \cdot (R5 + R6 + \frac{1}{C3 \cdot s})}{(R4 + \frac{1}{C2 \cdot s}) \cdot (R6 + \frac{1}{C3 \cdot s})} = \\ &= \frac{R4 \cdot C2 \cdot C3 \cdot s^2 \cdot (R5 + R6 + \frac{1}{C3 \cdot s})}{(R4 \cdot C2 \cdot s + 1) \cdot (R6 \cdot C3 \cdot s + 1)} + \frac{R4 \cdot C2 \cdot s \cdot (C3 \cdot (R5 + R6) \cdot s + 1)}{R4 \cdot C2 \cdot C3 \cdot R6 \cdot (s + \frac{1}{R4 \cdot C2}) \cdot (s + \frac{1}{R6 \cdot C3})} = \end{aligned}$$

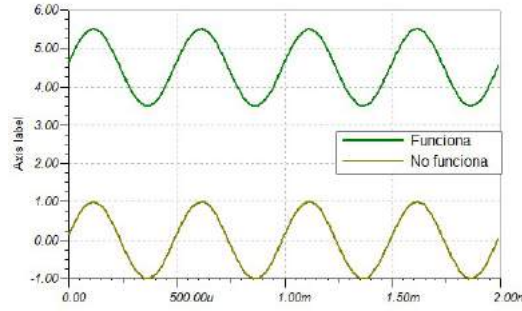


Figura 3.14: Polarización de la primera etapa de ganancia del efecto de distorsión

$$\frac{R5 + R6}{R6} \cdot \frac{s \cdot (s + \frac{1}{(R5 + R6) \cdot C3})}{(s + \frac{1}{R4 \cdot C2}) \cdot (s + \frac{1}{R6 \cdot C3})} = \frac{Vout}{Vin} \quad (3.14)$$

6. C2 se coloca en serie con la entrada para eliminar toda componente continua procedente de la etapa anterior. A su vez, junto con R4, crearán un filtro paso alto para frecuencias bajas, que se empleará para eliminar aquellas frecuencias bajas inaudibles.

Con establecer una frecuencia de corte entre  $10y30Hz$  será suficiente. Si consideramos una R4 de  $1M\Omega$ :

$$10 < \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot C2 \cdot R4} < 30 \quad (3.15)$$

Despejando C2 de la ecuación 3.15:

$$C2 = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot R4} \quad (3.16)$$

Sustituyendo en el rango:

$$C2 = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 10 \cdot 10^6 \Omega} = \mathbf{15.92 \text{ nF}} \quad (3.17)$$

$$C2 = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 30 \cdot 10^6 \Omega} = \mathbf{5.31 \text{ nF}} \quad (3.18)$$

$$\mathbf{5.31nF < C2 < 15.92nF}$$

7. C3 se conecta en serie con R6 formando otro filtro paso alto. Volveremos a establecer una frecuencia de corte entre  $10y30Hz$ :

$$10 < \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot C3 \cdot R6} < 30 \quad (3.19)$$

Despejando C3 de la ecuación 3.19:

$$C3 = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot R6} \quad (3.20)$$

Sustituyendo en el rango:

$$C3 = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 10 \cdot 10^4 \Omega} = \mathbf{1.59 \text{ uF}} \quad (3.21)$$

$$C3 = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 30 \cdot 10^4 \Omega} = \mathbf{530.8 \text{ nF}} \quad (3.22)$$

$$\mathbf{530.8nF < C3 < 1.59uF}$$

## 3.2.3.2 Simulaciones de la primera etapa)

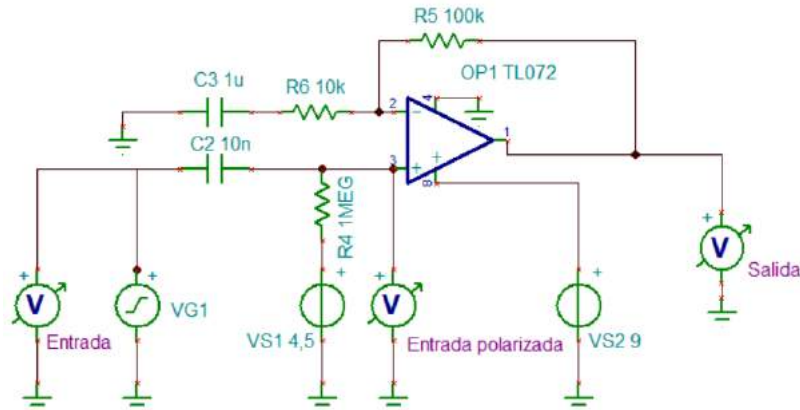


Figura 3.15: Circuito de la primera etapa de ganancia del efecto de distorsión

Primero comprobaremos si esta primera etapa de ganancia cumple con los requisitos de diseño. Se ha considerado que la señal de entrada es una señal sinusoidal de  $100mVp$ , y que el operacional tiene una alimentación asimétrica  $0 - 9V$ . La figura 3.16 muestra los resultados de la simulación del circuito de la 3.15.

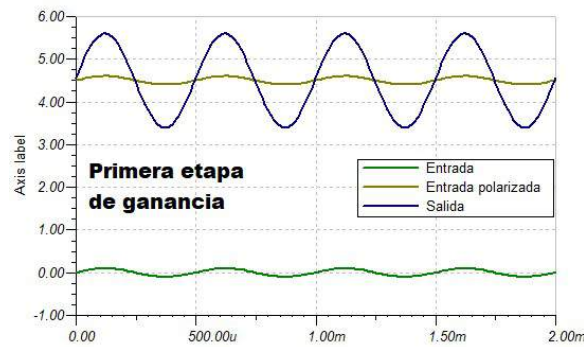


Figura 3.16: Señales de la primera etapa de ganancia del efecto de distorsión

Vemos como efectivamente la *entrada polarizada* es la misma que la *entrada* pero con un *offset* de  $4,5V$ , y que se consigue una ganancia de 10 a la *salida*. Si no tuvieramos la entrada superpuesta a una continua, la *salida* saldría recortada en todos los semiperiodos negativos.

Finalmente vamos a simular su comportamiento en frecuencia. Podemos comprobar en la figura 3.17 que el funcionamiento es el correcto, y acorde con la función de transferencia de la ecuación 5.

De los diagramas de la figura 3.11 podemos observar cómo se tiene un filtro paso alto que presenta:

- Un cero en  $0Hz$ .
- Un cero en  $\frac{1}{2 \cdot \pi \cdot C3 \cdot (R5 + R6)} = 1,45Hz$ .
- Un polo en  $\frac{1}{2 \cdot \pi \cdot C2 \cdot R4} = 15,9Hz$ .
- Un polo en  $\frac{1}{2 \cdot \pi \cdot C3 \cdot R6} = 15,9Hz$ .
- Una pendiente de  $40dB/dec$ , ya que hay dos ceros muy juntos.
- Un desfase de  $90^\circ$  en el cero, y un desfase de  $0^\circ$  en la zona en frecuencias medias.



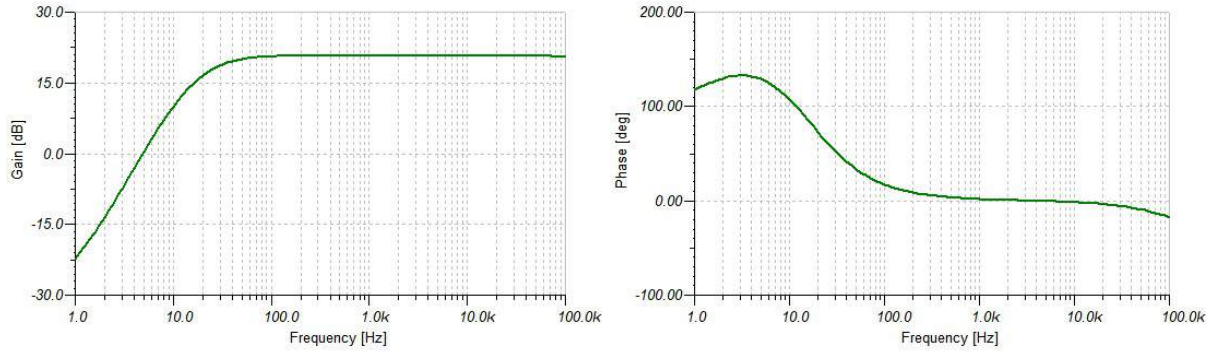


Figura 3.17: Diagrama de Bode de la primera etapa de ganancia del efecto de distorsión

- Una ganancia de  $20dB$  en el ancho de banda, lo esperado según la ecuación 3.13.

### 3.2.3.3 Segunda etapa

El circuito de la segunda etapa de ganancia sería el mostrado en la figura 3.18.

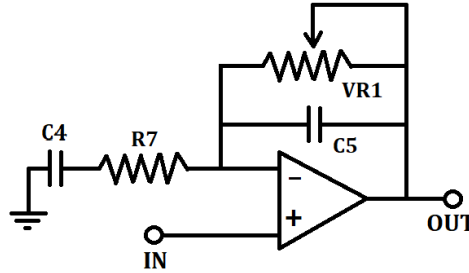


Figura 3.18: Segunda etapa de ganancia del efecto de distorsión

#### Consideraciones del diseño:

1. Podremos configurar la ganancia de esta etapa con el potenciómetro VR1 de forma que:

$$G2 = \left(1 + \frac{VR1}{R7}\right) \quad (3.23)$$

Esta ganancia se multiplicará por la ganancia de la primera etapa. La ganancia de esta etapa se va a adaptar al requisito que pongamos de ganancia total del efecto de distorsión, y las ganancias que hemos establecido en la primera etapa de ganancia y en la futura etapa de control de tono.

Pongamos que deseamos que el efecto de distorsión tenga una ganancia media de  $35dB$ . Si consideramos que la primera etapa tendrá una ganancia de  $20\log(G1) = 20dB$ , y que el control de tono tiene una ganancia media de  $-12dB$  (se explicará esto más adelante (figura 3.27)), necesitaremos que nuestra segunda etapa de ganancia nos aporte  $35 + 20 - 12 = 27dB$ , o en valores naturales  $10^{\frac{27}{20}} = 22,4$ , con lo que:

$$G2 = \left(1 + \frac{VR1}{R7}\right) = 22,4 \quad (3.24)$$

Consideramos, por ejemplo:

$$R7 = 5k\Omega$$

$$VR1 = 100k\Omega$$



2. Se aplicará un filtrado en el bucle de realimentación, es decir, un filtro con comportamiento paso banda. Esto lo haremos por 2 razones principales:

- Las frecuencias principales de una guitarra serán frecuencias medias.
- El control de tono presenta las ganancias más bajas ( $-15dB$  a  $-20dB$ ) en frecuencias medias

El comportamiento en baja frecuencia se regula con el conjunto C4 R7, en donde estableceremos inicialmente una frecuencia de corte entre  $50 - 100Hz$ :

$$50 < \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot C4 \cdot R7} < 100 \quad (3.25)$$

Despejando C4:

$$C4 = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot R7} \quad (3.26)$$

Sustituyendo en el rango de la ecuación 3.26:

$$C4 = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 5000\Omega} = \mathbf{637 \text{ nF}} \quad (3.27)$$

$$C4 = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 100 \cdot 5000\Omega} = \mathbf{318 \text{ nF}} \quad (3.28)$$

$$\mathbf{318nF < C4 < 637nF}$$

El comportamiento en alta frecuencia tiene algo más de complejidad debido a que depende del valor de VR1. Como a medida que aumente el valor de VR1 aumentará la ganancia, necesitaremos que la frecuencia de corte en frecuencias altas sea más pequeña para tener una atenuación aproximadamente constante en dichas frecuencias.

Para establecer los valores del condensador y el potenciómetro, partiremos de la mínima frecuencia de corte que queremos para frecuencias altas, que lo conseguiremos para el valor máximo de VR1. Podemos estimar que una frecuencia de corte adecuada puede ser entre  $15kHz$  y  $17kHz$ .

$$15k < \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot C5 \cdot VR1} < 17k \quad (3.29)$$

Despejando C5:

$$C5 = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot VR1} \quad (3.30)$$

Sustituyendo en el rango de la ecuación 3.30:

$$C5 = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 15k \cdot 10^5\Omega} = \mathbf{100 \text{ pF}} \quad (3.31)$$

$$C5 = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 17k \cdot 10^5\Omega} = \mathbf{93.6 \text{ pF}} \quad (3.32)$$

$$\mathbf{93.6pF < C5 < 100pF}$$

Analizamos la función de transferencia en frecuencia:

$$\begin{aligned}
 \frac{V_{out}}{V_{in}} &= \left(1 + \frac{VR1 // \frac{1}{C5 \cdot s}}{R7 + \frac{1}{C4 \cdot s}}\right) = \left(1 + \frac{\frac{VR1}{C5 \cdot s}}{\frac{VR1 + \frac{1}{C5 \cdot s}}{R7 + \frac{1}{C4 \cdot s}}}\right) = \\
 &= \left(1 + \frac{VR1 \cdot C4 \cdot s}{(VR1 \cdot C5 s + 1) \cdot (R7 \cdot C4 s + 1)}\right) = \left(1 + \frac{VR1 \cdot C4 \cdot s}{VR1 \cdot C5 \cdot R7 \cdot C4 \cdot (s + \frac{1}{VR1 \cdot C5}) \cdot (s + \frac{1}{R7 \cdot C4})}\right) = \\
 &= \frac{R7 \cdot C5 \cdot (s^2 + (\frac{1}{R7 \cdot C4} + \frac{1}{VR1 \cdot C5}) \cdot s + \frac{1}{VR1 \cdot R7 \cdot C4 \cdot C5} + s)}{C5 \cdot R7 \cdot (s + \frac{1}{VR1 \cdot C5}) \cdot (s + \frac{1}{R7 \cdot C4})} = \\
 &= \frac{s^2 + (\frac{1}{R7 \cdot C5} + \frac{1}{VR1 \cdot C5} + \frac{1}{R7 \cdot C4}) \cdot s + \frac{1}{VR1 \cdot R7 \cdot C4 \cdot C5}}{(s + \frac{1}{VR1 \cdot C5}) \cdot (s + \frac{1}{R7 \cdot C4})} \quad (3.33)
 \end{aligned}$$

### 3.2.3.4 Simulaciones de la segunda etapa

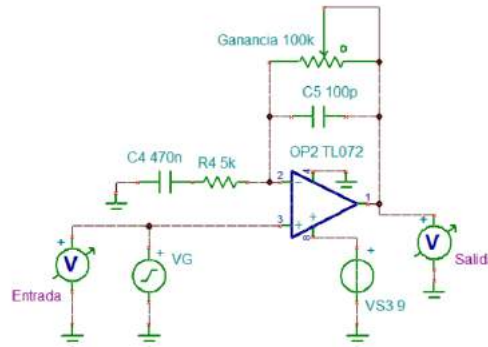


Figura 3.19: Circuito de la segunda etapa de ganancia del efecto de distorsión

Primero comprobaremos si la segunda etapa de ganancia cumple con los requisitos de diseño (figura 3.19).

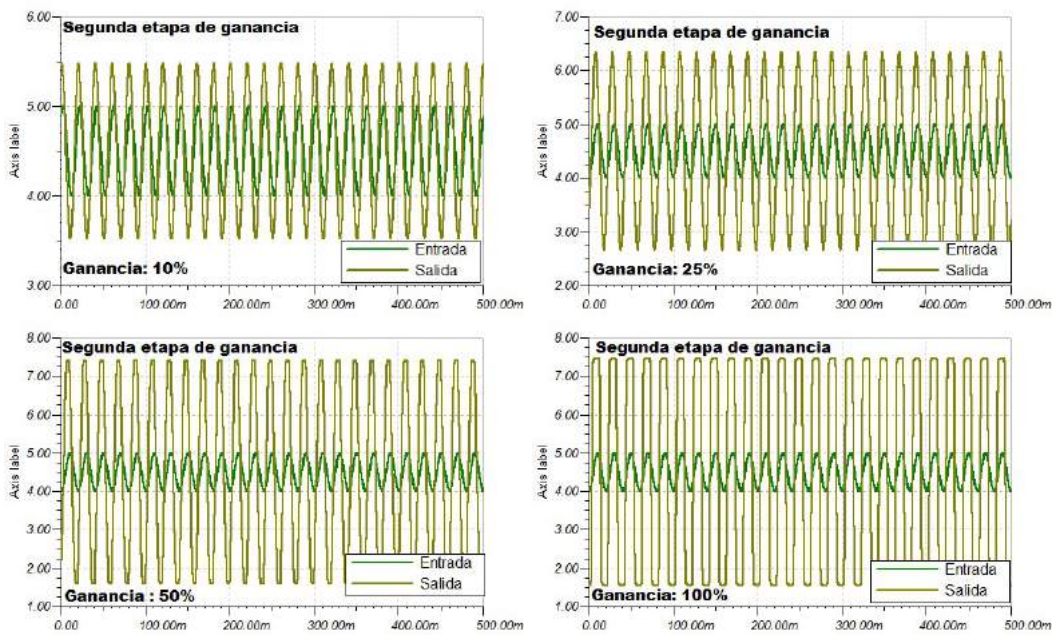


Figura 3.20: Señales de la segunda etapa de ganancia distorsión

Se ha considerado que la señal de entrada es una señal sinusoidal de  $500mV_p$ , y con una componente continua de  $4,5V$ , debido a la polarización en la primera etapa.

Como podemos observar en la figura 3.20, con el potenciómetro de la segunda etapa podemos ajustar la ganancia de la señal, obteniendo incluso un recorte de la misma previo a la etapa de recorte. Como podemos apreciar también, la ganancia no sigue una progresión lineal. Esto se debe a que, en el programa usado para la simulación, los potenciómetros vienen configurados como logarítmicos.

En la práctica, usaremos tanto potenciómetros logarítmicos como lineales, pero para el análisis y comprobación teórica es suficiente con el logarítmico. A continuación vamos a simular su comportamiento en frecuencia.

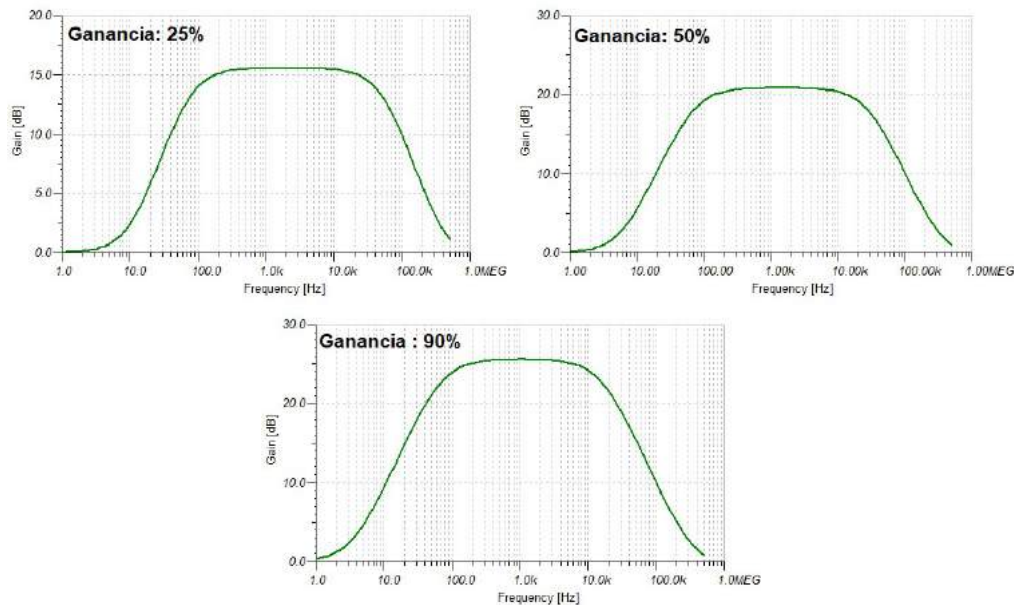


Figura 3.21: Diagrama de Bode de la segunda etapa de ganancia distorsión

En la figura 3.21 podemos comprobar que con el potenciómetro se incrementa la ganancia del sistema, y que se modifican además el ancho de banda debido a que en la ecuación 3.2.3.3, hay ceros y polos que dependen de VR1.

### 3.2.3.5 Especificaciones del diseño

Son las mostradas en la tabla 3.2.

Componente	Valor/Tipo
R4	$1M\Omega$
R5	$100k\Omega$
R6	$10k\Omega$
R7	$5k\Omega$
VR1	$100k\Omega$
C2	$10nF$
C3	$1\mu$
C4	$470nF$
C5	$100pF$
AMP1	TL072

Tabla 3.2: Parámetros de la etapa de ganancia distorsión

### 3.2.4 Etapa de recorte

La etapa de recorte será muy sencilla (figura 3.22), con dos diodos conectados a masa, de manera que se recortará la señal bipolarmente cuando la señal alcance el valor de  $V_f$  o  $-V_f$  de los diodos. En nuestro caso, emplearemos los diodos 1N914, que tienen una  $V_f$  de alrededor de 1 V. Recordemos que, aunque se puede recortar con el uso de los propios operacionales de la etapa de ganancia, para conseguir una distorsión fuerte se necesita un recorte más agresivo, de ahí el empleo de diodos en esta etapa.

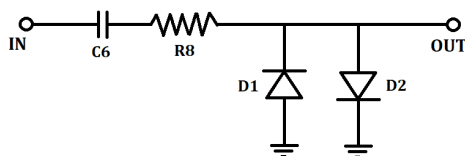


Figura 3.22: Etapa de recorte distorsión

El condensador C6 se conecta para eliminar la parte continua de la señal de salida de la etapa de ganancia, para que a la etapa de control de tono le proporcionemos la señal alterna original de la salida de a guitarra, pero con una ganancia más alta. Un valor de 1 $\mu$ F sería muy apto, pero se podría poner otros, debido a que con él no formamos ningún filtro. La resistencia R8 se coloca como protección para limitar la corriente que circule en los diodos. La corriente máxima del diodo 1N914 es de 75mA, por lo tanto con un valor muy típico de 1k es más que suficiente, pero se podrían poner otros valores.

#### 3.2.4.1 Simulaciones

Ahora simularemos el circuito para comprobar que la forma de recorte de la señal es la deseada:

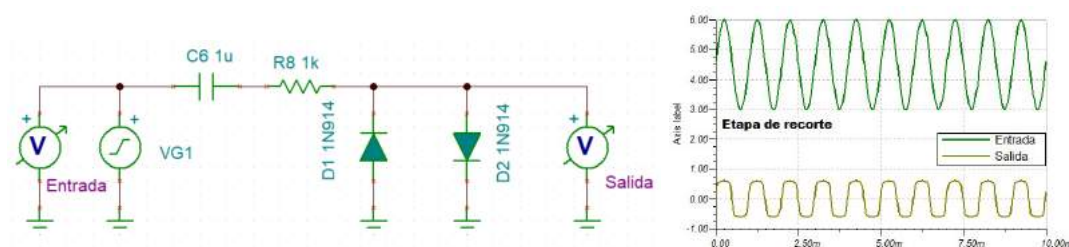


Figura 3.23: Simulación de la etapa de recorte distorsión

En la figura 3.23 vemos que el recorte es bueno, y simétrico, consiguiendo una señal más parecida a la buscada para la distorsión.

#### 3.2.4.2 Especificaciones del diseño

Son las mostradas en la tabla 3.3.

Componente	Valor/Tipo
R8	1k $\Omega$
C6	1 $\mu$ F
D1	1N914
D2	1N914

Tabla 3.3: Parámetros de la etapa de recorte distorsión

### 3.2.5 Etapa de control de tono

El control de tono va a ser una de las peculiaridades de este diseño. Un control de tono permite al usuario adaptar las ganancias de la salida dependiendo de la frecuencia de la señal de la entrada. En otras palabras, hacer que tengan más presencias ciertos sonidos frente a otros.

En este tipo de diseños consideraremos 3 grupos de sonidos, bajos, medios o agudos, dependiendo de las notas que se toquen en la guitarra. El control de tono nos permitirá darles presencias distintas a estos 3 tipos de notas musicales en mi sonido de salida del amplificador.

Un práctica muy común es diseñar el control de tono de tal forma que se proporcione más ganancia a las frecuencias bajas y altas, y menos a las medias, ya que la guitarra eléctrica es un instrumento que genera sonidos fundamentalmente a frecuencias medias, y puede ser preciso atenuar la presencias de éstas para dar más protagonismo a las bajas y altas.

La base de los controles de tonos de los efectos de distorsión suelen ser las mismas: proporcionar una cresta en la respuesta en frecuencia que disminuya más las notas medias, ya que en etapas anteriores son las más amplificadas, y mantener ganancias similares para bajos y agudos.

Esto por supuesto no es una regla fija, puesto que cada diseño adapta su control de tono para conseguir el sonido que requiera: si quiero que los bajos de mi sonido tengan fuerza, subiré la cresta de bajos en mi base para el control de tono, y lo mismo para medios y agudos.

Lo más habitual es encontrarte efectos de distorsión con sólo un potenciómetro para configurar el tono, que básicamente lo que hará será desplazar la frecuencia de corte en frecuencias medias. Si quiero mas presencia de bajos, haré la frecuencia de corte más grande, y si quiero más presencia de agudos, la haré más pequeña.

Esta configuración es muy válida, porque permite obtener diferentes sonidos con un sólo potenciómetro, que resulta muy sencillo a nivel de usuario. Sin embargo, se va a optar por un control de tono más parecidos a los que emplean los amplificadores, que te permite la configuración por separado de bajos, medios y agudos. Se ha optado por esta alternativa ya que se consideró muy interesante la configuración independiente y puede proporcionar al usuario un sonido mucho más personalizado a sus gustos y necesidades (figura 3.24).

Nos hemos basado en una configuración muy utilizada tanto en amplificadores *Fender* y *Marshall* (dos de las grandes marcas de amplificadores a nivel mundial).

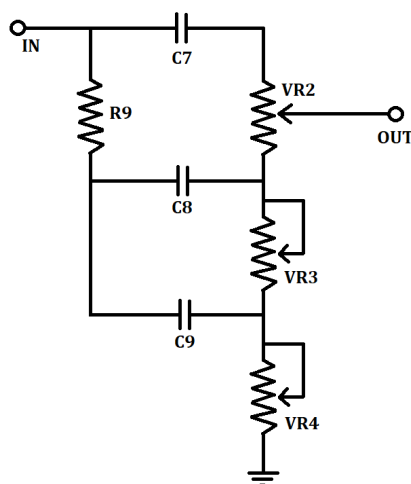


Figura 3.24: Circuito del control de tono distorsión

Hay muchísimas variaciones de esta configuración, y ninguna es mejor que otra, simplemente producen un sonido distinto o se adaptan mejor a un diseño de distorsión u otro. Por lo tanto, se decidió empezar analizando esta configuración para comprobar que respuesta en frecuencia nos ofrece, y o bien adaptar nuestro diseño a este control de tono, o bien modificar este control de tono para adaptarlo al diseño, o bien buscar otra configuración si no nos convencían sus prestaciones.

Vamos a proceder a analizar el circuito, para obtener las expresiones matemáticas de la tensión de salida y sus corrientes.

### 3.2.5.1 Análisis en frecuencia

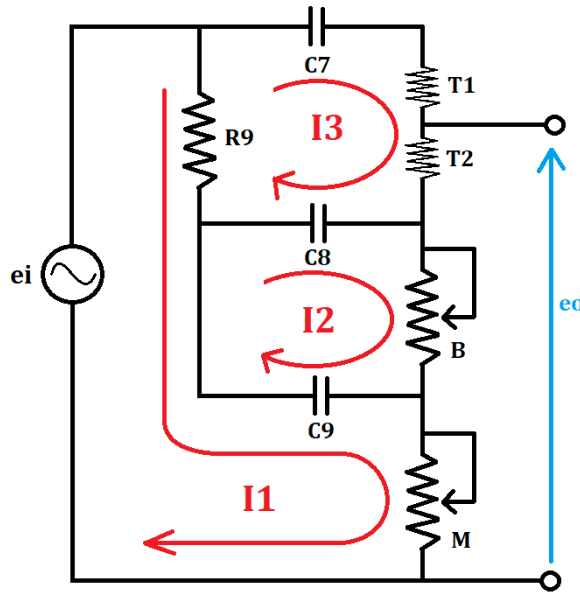


Figura 3.25: Análisis del control de tono distorsión (mallas)

Las resistencias B, M, T1 y T2 dependerán de los valores que se configuren mediante los potenciómetros de *Bass*, *Middle* y *Treble* respectivamente (figura 3.25).

Empezaremos por obtener el sistema de ecuaciones en el régimen temporal:

$$R9 \cdot i1(t) - R9 \cdot i2(t) + \frac{1}{C9} \int_0^t i1(t)dt - \frac{1}{C9} \int_0^t i3(t)dt + M \cdot i1(t) = ei(t) \quad (3.34)$$

$$R9 \cdot i2(t) - R9 \cdot i1(t) + \frac{1}{C8} \int_0^t i2(t)dt + (T1 + T2) \cdot i2(t) + \frac{1}{C7} \int_0^t i2(t)dt - \frac{1}{C8} \int_0^t i3(t)dt = 0 \quad (3.35)$$

$$\frac{1}{C8} \int_0^t i3(t)dt - \frac{1}{C8} \int_0^t i2(t)dt + B \cdot i3(t) + \frac{1}{C9} \int_0^t i2(t)dt - \frac{1}{C9} \int_0^t i1(t)dt = 0 \quad (3.36)$$

$$T2 \cdot i2(t) + B \cdot i3(t) + M \cdot i1(t) = eo(t) \quad (3.37)$$

A continuación reescribiremos el sistema de ecuaciones al régimen de Laplace:

$$I1(s) \cdot R9 - I2(s) \cdot R9 + \frac{1}{C9 \cdot s} \cdot I1(s) - \frac{1}{C9 \cdot s} \cdot I3(s) + M \cdot I1(s) = Ei(s) \quad (3.38)$$

$$I2(s) \cdot R9 - I1(s) \cdot R9 + \frac{1}{C7 \cdot s} \cdot I2(s) + (T1 + T2) \cdot I2(s) + \frac{1}{C8 \cdot s} \cdot I2(s) - \frac{1}{C8 \cdot s} \cdot I3(s) = 0 \quad (3.39)$$

$$I3(s) \cdot B + \frac{1}{C8 \cdot s} \cdot I3(s) + \frac{1}{C8 \cdot s} \cdot I3(s) - \frac{1}{C9 \cdot s} \cdot I1(s) - \frac{1}{C8 \cdot s} \cdot I2(s) = 0 \quad (3.40)$$

Multiplicaremos por “s” todos los términos para eliminarla de los denominadores:

$$I1(s) \cdot R9 \cdot s - I2(s) \cdot R10 \cdot s + \frac{1}{C9} \cdot I1(s) - \frac{1}{C9} \cdot I3(s) + M \cdot I1(s) \cdot s = Ei(s) \cdot s \quad (3.41)$$

$$I2(s) \cdot R9 \cdot s - I1(s) \cdot R9 \cdot s + \frac{1}{C7} \cdot I2(s) + (T1 + T2) \cdot I2(s) \cdot s + \frac{1}{C8} \cdot I2(s) - \frac{1}{C8} \cdot I3(s) = 0 \quad (3.42)$$

$$I3(s) \cdot B \cdot s + \frac{1}{C8} \cdot I3(s) + \frac{1}{C8} \cdot I3(s) - \frac{1}{C9} \cdot I1(s) - \frac{1}{C8} \cdot I2(s) = 0 \quad (3.43)$$

Agrupando por corrientes nos queda:

$$I1(s) \cdot ((R9 + M) \cdot s + \frac{1}{C9}) - I2(s) \cdot R9 \cdot s - I3(s) \cdot \frac{1}{C9} = Ei(s) \cdot s \quad (3.44)$$

$$-I1(s) \cdot R9 \cdot s + I2(s) \cdot ((R10 + T1 + T2) \cdot s + \frac{1}{C7} + \frac{1}{C8}) - I3(s) \cdot \frac{1}{C8} = 0 \quad (3.45)$$

$$-I1(s) \cdot \frac{1}{C9} - I2(s) \cdot \frac{1}{C8} + I3(s) \cdot (B \cdot s + (\frac{1}{C9} + \frac{1}{C8})) = 0 \quad (3.46)$$

$$Eo(s) = T2 \cdot Is(s) + B \cdot I3(s) + M \cdot I1(s) \quad (3.47)$$

Nos resulta las siguientes matrices:

$$\begin{bmatrix} (R9 + M \cdot s) + \frac{1}{C9} & -R9 \cdot s & \frac{-1}{C9} \\ -R9 \cdot s & (R9 + T1 + T2) \cdot s + \frac{1}{C7} + \frac{1}{C8} & \frac{-1}{C8} \\ \frac{-1}{C9} & \frac{-1}{C8} & B \cdot s + \frac{1}{C9} + \frac{1}{C8} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I1(s) \\ I2(s) \\ I3(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Ei(s) \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.48)$$

Aplicando *Cramer* y siendo  $\Delta$  al determinante de la matriz nos quedan las corrientes de este modo:

$$I1(s) = \frac{\begin{bmatrix} Ei(s) \cdot s & -R9 \cdot s & \frac{-1}{C9} \\ 0 & (R9 + T1 + T2) \cdot s + \frac{1}{C7} + \frac{1}{C8} & \frac{-1}{C8} \\ 0 & \frac{-1}{C8} & B \cdot s + \frac{1}{C9} + \frac{1}{C8} \end{bmatrix}}{\Delta} \quad (3.49)$$

$$I2(s) = \frac{\begin{bmatrix} (R9 + M \cdot s) + \frac{1}{C9} & Ei(s) \cdot s & \frac{-1}{C9} \\ -R9 \cdot s & 0 & \frac{-1}{C8} \\ \frac{-1}{C9} & 0 & B \cdot s + \frac{1}{C9} + \frac{1}{C8} \end{bmatrix}}{\Delta} \quad (3.50)$$

$$I3(s) = \frac{\begin{bmatrix} (R9 + M \cdot s) + \frac{1}{C9} & -R9 \cdot s & Ei(s) \cdot s \\ -R9 \cdot s & (R9 + T1 + T2) \cdot s + \frac{1}{C7} + \frac{1}{C8} & 0 \\ \frac{-1}{C9} & \frac{-1}{C8} & 0 \end{bmatrix}}{\Delta} \quad (3.51)$$

### 3.2.5.2 Simulaciones

Ahora vamos a simular el circuito (figura 3.26), considerando unos valores típicos para esta configuración:

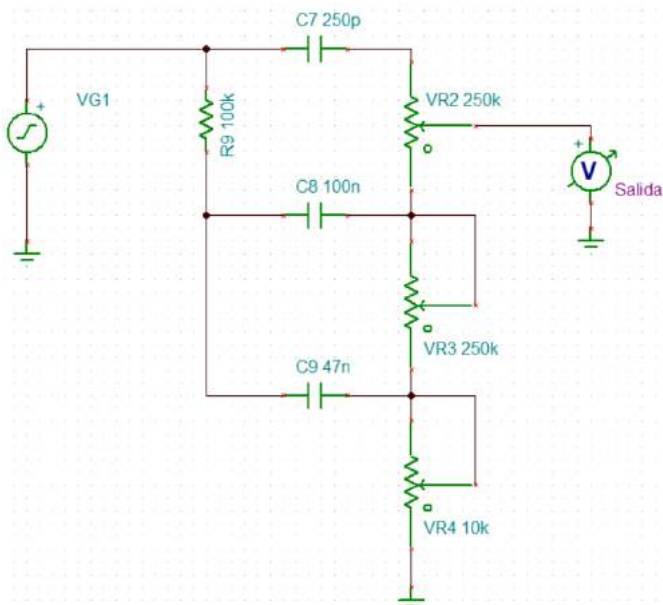


Figura 3.26: Simulación del control de tono distorsión

A continuación vamos a analizar el diagrama de Bode del control de tono, para observar la variación de la ganancia en función del valor de los potenciómetros y de la frecuencia de la señal de entrada.

Comenzaremos con una configuración básica, con todos los potenciómetros a la mitad de su valor (figura 3.27):

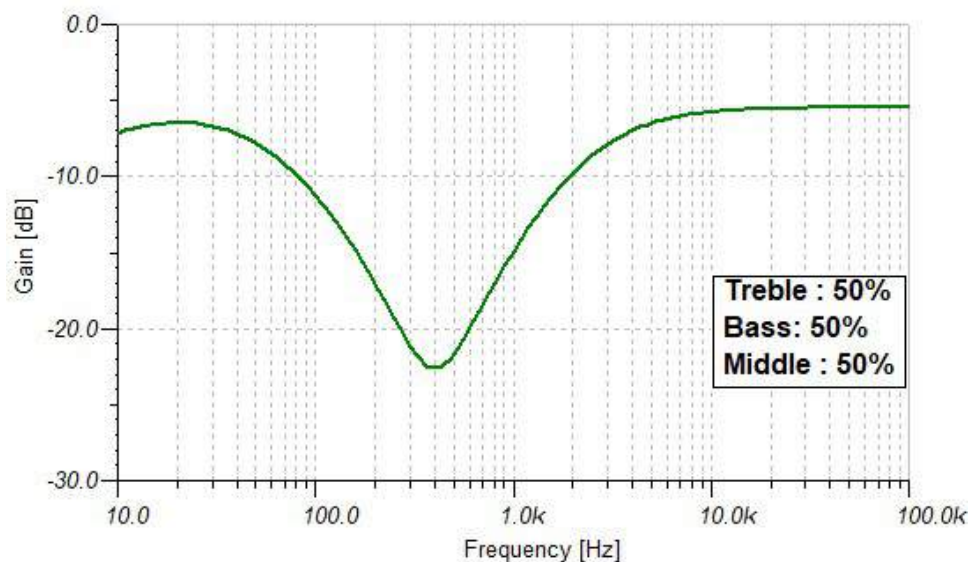


Figura 3.27: Diagrama de Bode del control de tono (T50 B50 M50)

Aquí se puede observar cómo se consigue atenuar los tonos medios, y proporcionar más presencia a los bajos y altos.

Además, se puede observar que se consiguen valores negativos de ganancia para todo el rango de frecuencia, razón por la que se proporciona un extra de ganancia en la etapa de ganancia (ecuación 3.24).



A continuación se ha querido analizar el comportamiento cuando se acentúa solo un rango de frecuencias (figura 3.28), para comprobar la versatilidad que proporciona esta configuración a la hora de modificar el tono de la señal:

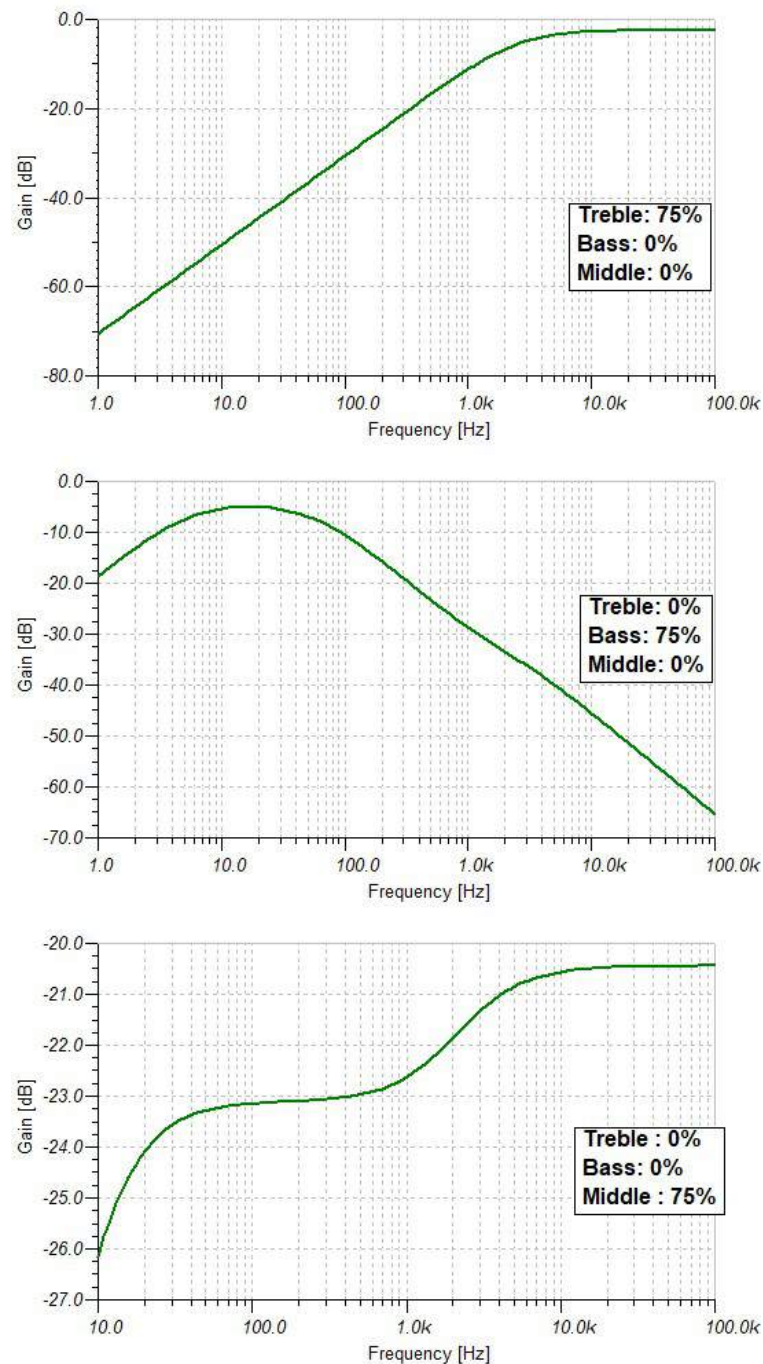


Figura 3.28: Diagrama de Bode del control de tono distorsión

Se puede observar claramente las grandes diferencias de ganancias para las diferentes configuraciones de los potenciómetros. En cada una de las simulaciones se puede observar cómo se acentúan las frecuencias correspondientes al rango de frecuencia del potenciómetro que más se incrementa, obteniendo comportamientos totalmente diferentes en todo en ancho de banda.

Para terminar, se quiso simular un caso un poco más realista, con una configuración que de partida fuera equilibrada, pero en la que se desee aumentar un poco la ganancia en las frecuencias altas, y disminuirla en las medias y bajas (figura 3.29).

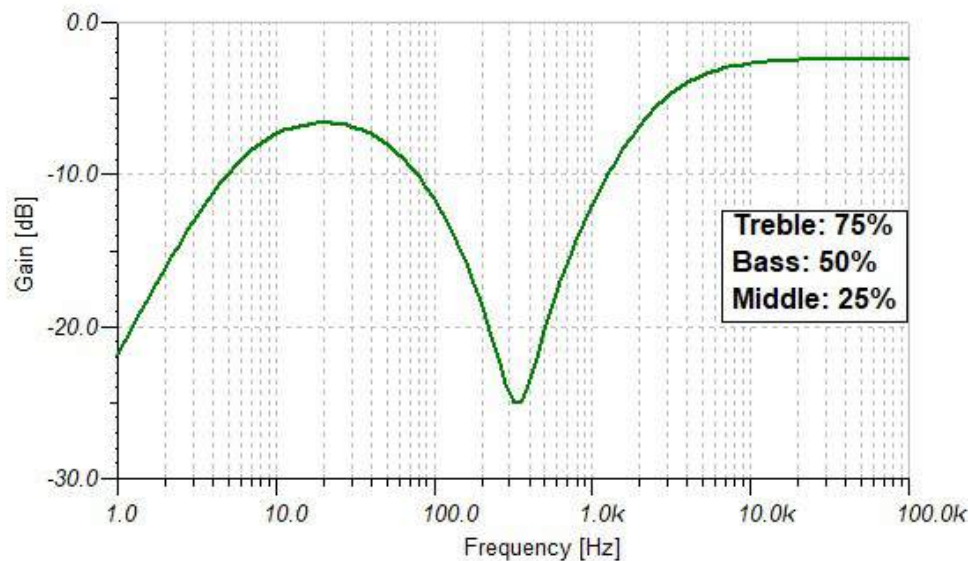


Figura 3.29: Diagrama de Bode del control de tono distorsión (T75 B50 M25)

Se puede observar que se ha conseguido una forma muy similar a la primera simulación (figura 3.27), pero con una clara bajada de las frecuencias medias y una subida de las frecuencias altas.

Podemos concluir que el control de tono consigue los resultados esperados, y que permite un control aceptable de los diferentes rangos de frecuencias de la guitarra eléctrica.

### 3.2.5.3 Especificaciones del diseño

Son las mostradas en la tabla 3.4.

Componente	Valor/Tipo
R9	100k $\Omega$
VR2	250k $\Omega$
VR3	250 $\Omega$
VR4	10k $\Omega$
C7	250pF
C8	100nF
C9	47nF

Tabla 3.4: Parámetros de la etapa de control de tono distorsión

### 3.2.6 Buffer de salida

La tarea del *buffer* de salida es muy similar al de entrada, pero esta vez para conseguir una impedancia de salida baja de mi sistema (figura 3.30). Una impedancia baja de salida es clave para que se mantenga la integridad de la señal a la entrada de la etapa siguiente. Se seguirá empleando la configuración de colector común, o seguidor de emisor, pero con pequeñas variaciones que ahora explicaremos:

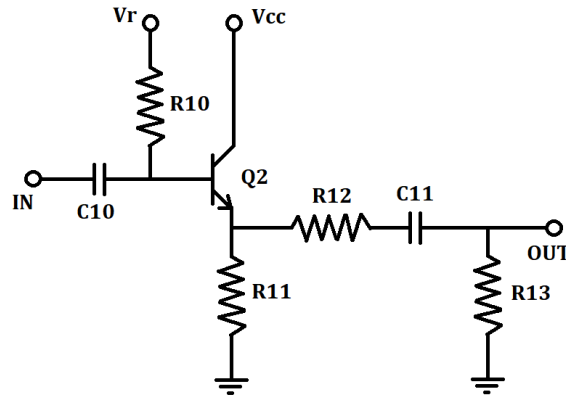


Figura 3.30: Circuito del *buffer* de salida distorsión

Los valores de  $R_{10}$ ,  $R_{11}$  y  $C_{10}$  podrán ser iguales o muy parecidos a los que se utilizaron en el *buffer* de entrada, ya que la finalidad de esa parte del circuito será la misma que a la entrada del sistema. El condensador  $C_{11}$  nos servirá para eliminar toda componente continua en la etapa final del diseño.

#### 3.2.6.1 Análisis en CA

Analizamos el circuito en corriente alterna, con el resultado mostrado en la figura 3.31.

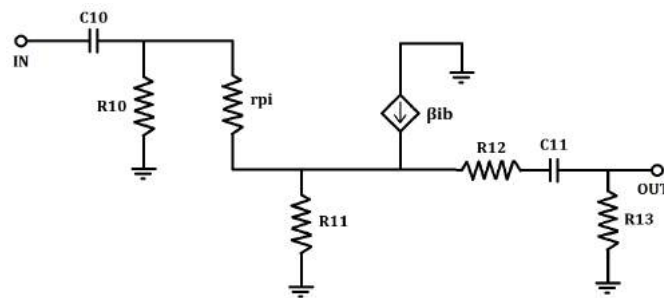


Figura 3.31: Análisis en CA del *buffer* de salida distorsión

Simplificando el circuito equivalente nos queda (figura 3.32):

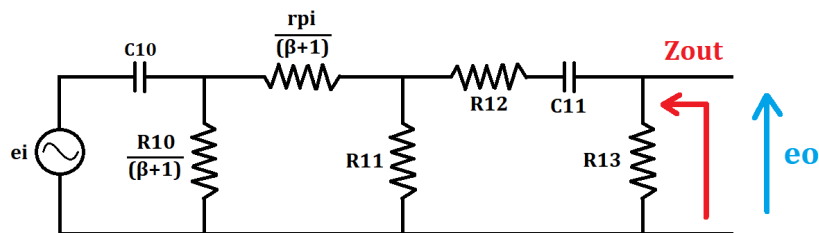


Figura 3.32: Circuito equivalente del *buffer* de salida distorsión

Finalmente tenemos que :

$$Z_{out} = (R13 || (R12 + (R11 || \frac{(r_{pi} + R10)}{(\beta + 1)}))) \quad (3.52)$$

**Consideraciones del diseño:**

- Debido a que  $r_{pi} \ll R10$  podemos despreciar su valor.
- R10 tendrá un valor igual a la R2 del *buffer* de entrada, es decir  $1M\Omega$

$$\boxed{R10 = 1M\Omega}$$

- R11 tendrá un valor igual a la R3 del *buffer* de entrada, es decir  $10k\Omega$

$$\boxed{R11 = 10k\Omega}$$

Como nos queda la impedancia de salida en función de R13 y R12, primero estableceremos el valor de R13 para el filtro.

### 3.2.6.2 Análisis en frecuencia

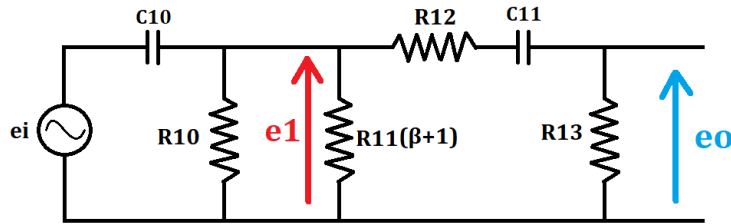


Figura 3.33: Análisis en frecuencia del *Buffer* de salida distorsión

De acuerdo con el propósito de C10, el filtro paso alto tendrá como objetivo eliminar aquellos ruidos procedentes de frecuencias bajas inaudibles por el ser humano.

Si analizamos el circuito en frecuencia (figura 3.33) y teniendo en cuenta los análisis previos del *buffer* de entrada sabemos que:

$$\frac{E1(s)}{Ei(s)} = \frac{s}{s + \frac{1}{C10 \cdot R10}} \quad (3.53)$$

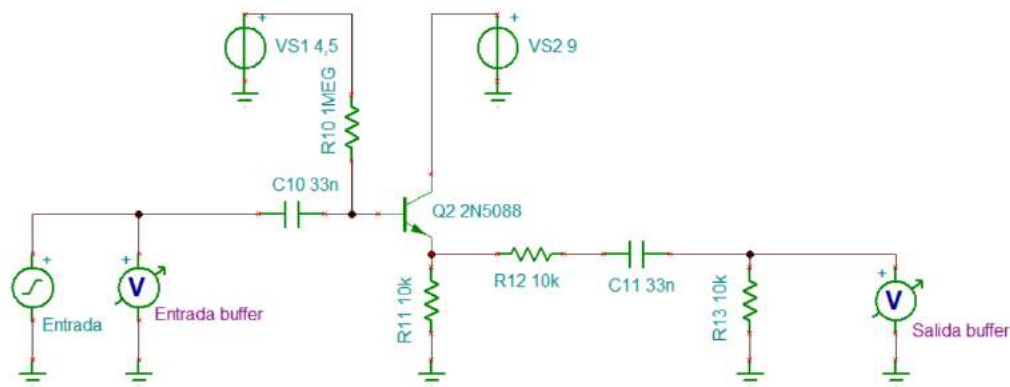
$$\frac{Eo(s)}{E1(s)} = \frac{R13}{R12 + R13} \cdot \frac{s}{s + \frac{1}{C11 \cdot (R12 + R13)}} \quad (3.54)$$

Por lo tanto, en una primera aproximación, podríamos establecer que  $R12 = R1$ ,  $R13 = R2$  y  $C10 = C1$ , y de este modo tener un polo doble en el mismo rango de frecuencias que en el de entrada.

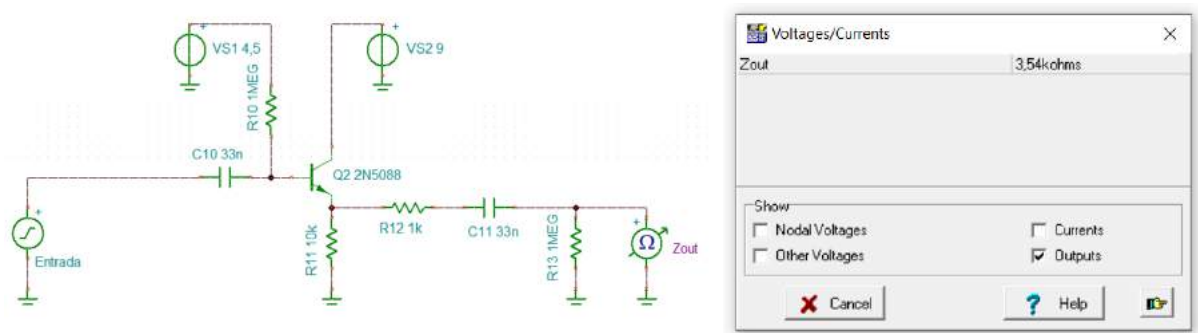
$$\frac{Eo(s)}{Ei(s)} = \frac{R13}{R12 + R13} \cdot \frac{s^2}{(s + \frac{1}{C10 \cdot R10}) \cdot (s + \frac{1}{C11 \cdot (R12 + R13)})} \quad (3.55)$$

Con estos valores, y considerando  $\beta = 350$ , tendremos una impedancia de salida de  $3,2k\Omega$ , un buen valor para nuestros objetivos.

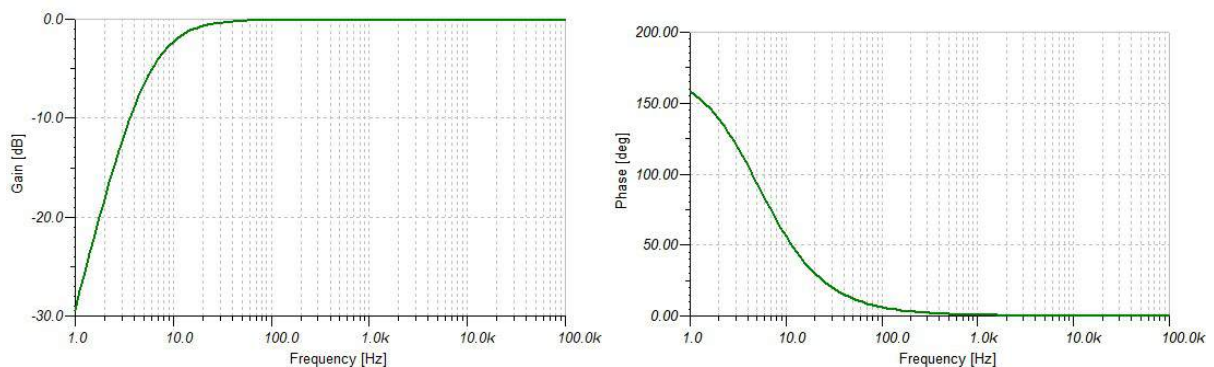
## 3.2.6.3 Simulaciones

Figura 3.34: Simulación del *buffer* salida distorsión

Para comprobar que efectivamente se consigue reducir la impedancia de salida del circuito, conectaremos un *óhmetro* a la salida del circuito, con el resultado mostrado en la figura 3.34. Como puede

Figura 3.35: Simulación de la impedancia de salida del *buffer* de salida distorsión

observarse en la figura 3.35, obtenemos una impedancia de salida muy similar a la prevista teóricamente. A continuación, comprobaremos el comportamiento en frecuencia del *buffer* de salida:

Figura 3.36: Diagrama de bode del *buffer* salida distorsión

Podemos comprobar que el funcionamiento es el correcto, y de acuerdo a la función de transferencia (ecuación 3.55). De los diagramas de la figura 3.36 podemos observar cómo se tiene un filtro paso alto que presenta:

- Un cero doble en  $0Hz$ .
- Un polo doble en  $\frac{1}{2 \cdot \pi \cdot C10 \cdot R10} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot C11 \cdot (R12 + R13)} = 4,8Hz$ .
- Una pendiente de  $40dB/dec$  debido al cero doble.
- Un desfase de  $180^\circ$  en el cero doble, y un desfase de  $0^\circ$  en el polo doble.
- Una ganancia de  $0dB$  en el ancho de banda.

#### 3.2.6.4 Especificaciones del diseño

Son las mostradas en la tabla 3.5.

Componente	Valor/Tipo
R10	$1M\Omega$
R11	$10k\Omega$
R12	$10k\Omega$
R13	$1M\Omega$
C10	$33nF$
C11	$33nF$
Q2	2N5088

Tabla 3.5: Parámetros del *buffer* de salida distorsión

#### 3.2.7 Referencia de tensión

Como ya hemos visto anteriormente, tanto para la polarización de los transistores de los *buffers* como en los amplificadores operacionales, se precisará de una tensión de referencia.

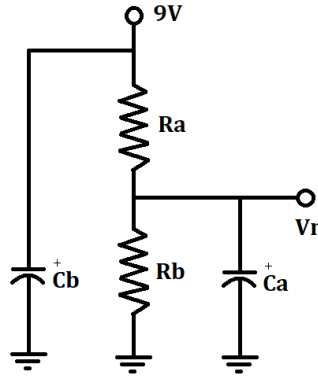


Figura 3.37: Referencia de tensión distorsión

Con el objetivo de hacerlo sencillo, se ha optado por un simple divisor de tensión, que para la aplicación resulta más que suficiente (figura 3.37). Por lo general se establecerá que  $Ra = Rb$ , para así tener una referencia de tensión de  $4,5V$  y simplificar el circuito, pero se podría tener otro voltaje de referencia sin mayor problema, siempre que no interfiera en los requisitos de polarización de los diferentes componentes del circuito.

Los condensadores se han incluido para filtrar los dos voltajes, tanto el de  $9V$  como el de referencia. El condensador  $Cb$  sería opcional, puesto que los  $9V$  ya vendrían filtrados de la etapa de alimentación. Sin embargo, si el espacio de la placa del circuito lo permite, sería recomendable ponerlo.

### 3.2.7.1 Especificaciones del diseño

Son las mostradas en la tabla 3.6.

Componente	Valor/Tipo
Ra	$10k\Omega$
Rb	$10k\Omega$
Ca	$47\mu F$
Cb	$47\mu F$

Tabla 3.6: Parámetros de la referencia de tensión distorsión

3.2.8 Circuito completo

El circuito completo del efecto de distorsión sería el mostrado en la figura 3.38.

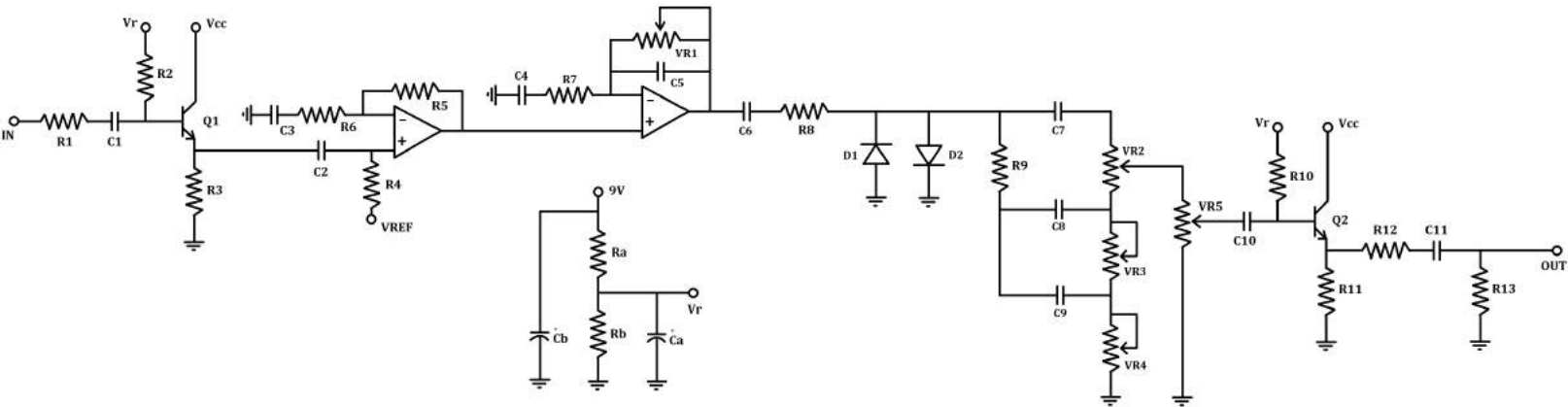


Figura 3.38: Circuito completo distorsión

Resistencia	Valor
Ra	10kΩ
Rb	10kΩ
R1	1kΩ
R2	1MΩ
R3	10kΩ
R4	1MΩ
R5	100kΩ

Resistencia	Valor
R6	10kΩ
R7	5kΩ
R8	1kΩ
R9	100kΩ
R10	1MΩ
R11	10kΩ
R12	10kΩ
R13	1MΩ

Condensador	Valor
Ca	47uF
Cb	47uF
C1	33nF
C2	10nF
C3	1uF
C4	470nF
C5	100pF
C6	1uF
C7	250pF
C8	100nF
C9	47nF
C10	33nF
C11	33nF

Potenciómetro	Valor
VR1	100kΩ
VR2	250kΩ
VR3	250kΩ
VR4	10kΩ
VR5	100kΩ

Transistor	Tipo
Q1	2N5088
Q2	2N5088
Amp.Operacional	Tipo
AMP1	TL072
Diodo	Tipo
D1	1N914
D2	1N914



### 3.2.9 Diseño de la placa de circuito impreso (PCB)

Se ha empleado el software *Fritzing* [18] para hacer el esquema de conexiones del circuito (figura 3.39)

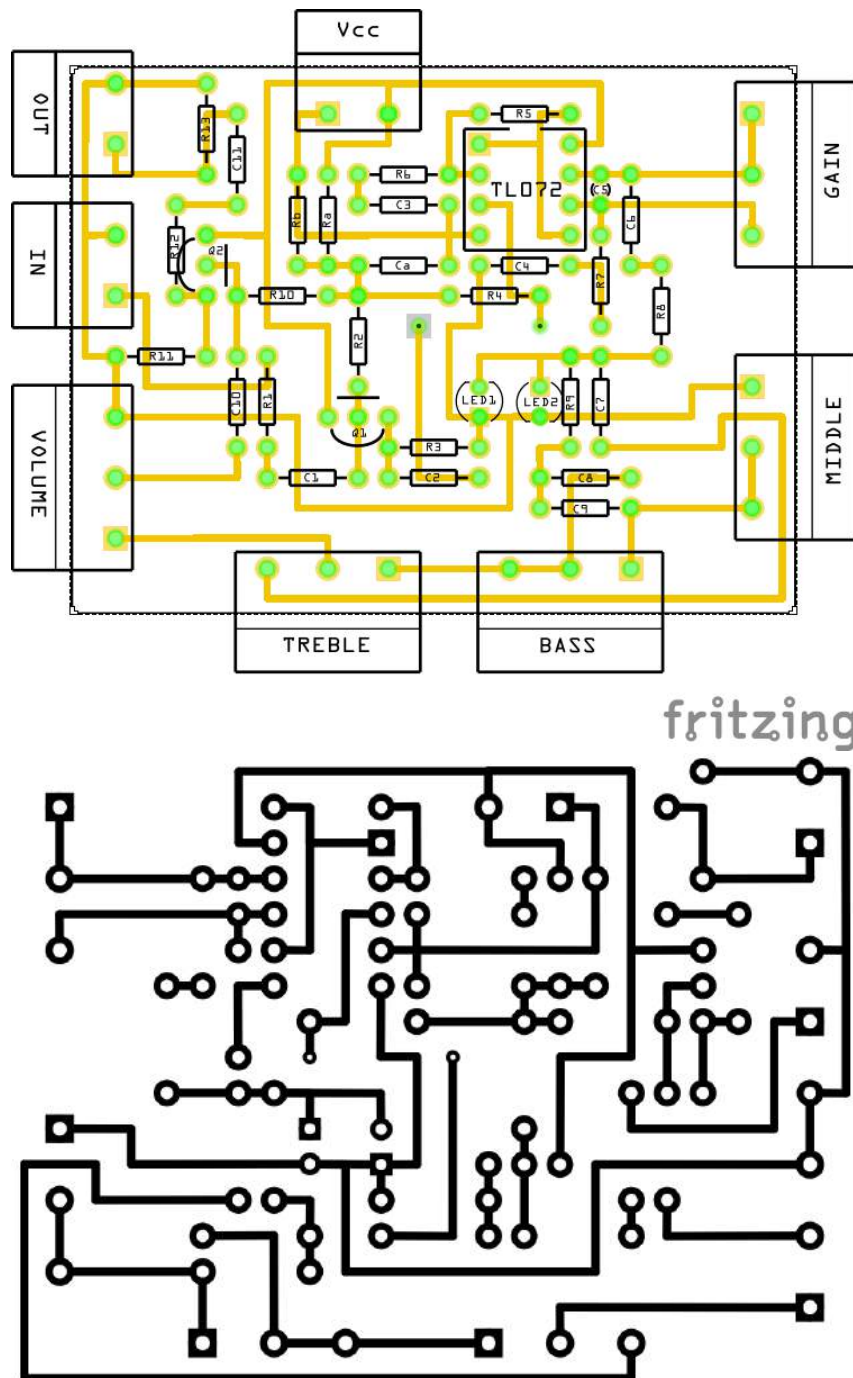


Figura 3.39: PCB del efecto de distorsión

### 3.2.10 Fabricación

Se ha fabricado el efecto de distorsión en una placa perforada (figura 3.40).

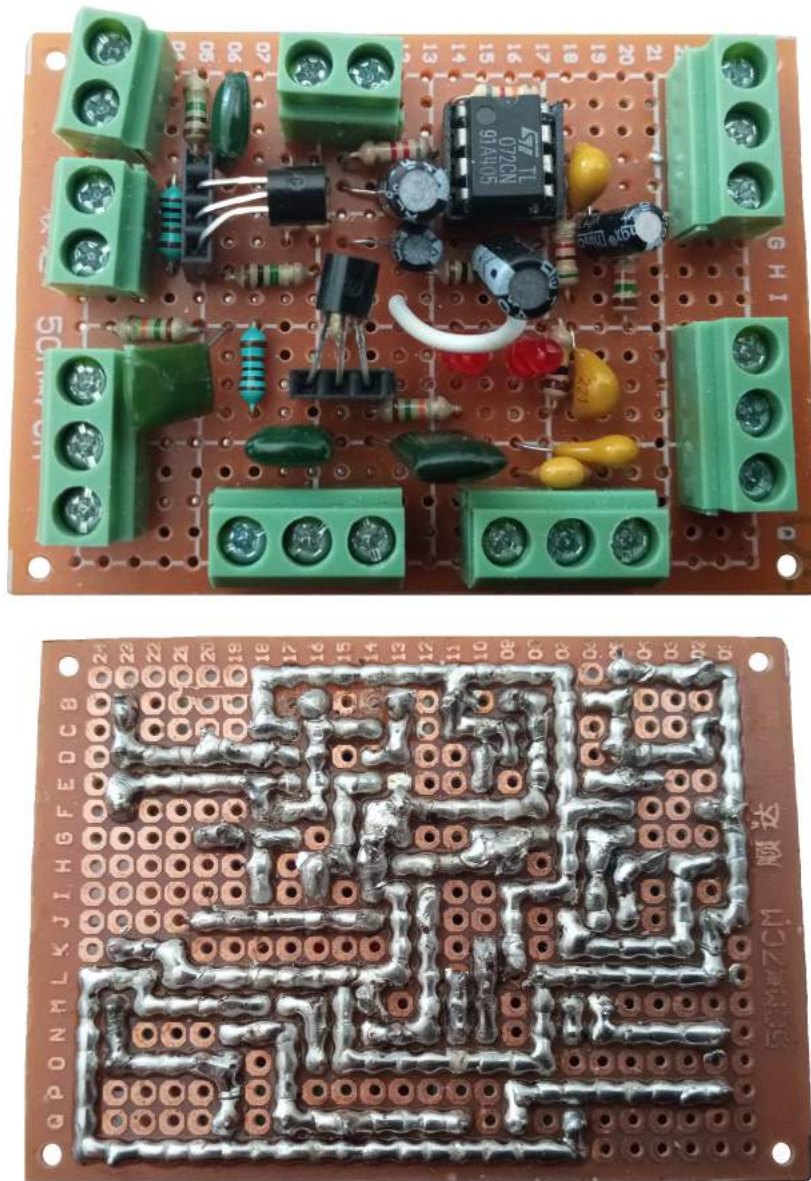


Figura 3.40: PCB placa distorsión fabricada

## 3.3 Retardo (*delay*)

### 3.3.1 Introducción

En este apartado, igual que para los efectos de distorsión, se va a exponer el origen de los efectos de retardo, y cuáles fueron las razones para emular y aplicar este efecto de la naturaleza a los sistemas de audio.

Como ya hemos comentado, el origen de los efectos de retardo radica en el deseo de poder imitar y controlar el fenómeno acústico que se produce cuando las ondas sonoras rebotan en una superficie y regresa hasta el punto de su emisor.

Al igual que con el efecto de distorsión, determinar de manera precisa el origen de la idea de aplicar el efecto de *delay* es complicado. Sí que podemos afirmar que uno de los pioneros en el desarrollo de este tipo de efectos fue el *Lester William Polsfuss*, mas conocido como *Les Paul*, nombre que ya se ha citado anteriormente en repetidas ocasiones.

*Les Paul* fue un músico, compositor e inventor de mediados del siglo XX, famoso por sus grandes innovaciones en los sistemas de grabación de la época, y diseñador de uno de los modelos de guitarra más famosos de la historia.

A principios de la década de los 50s, *Les Paul* y otros técnicos de sonido y grabación comenzaron a conectar entre sí varias unidades multipistas, controlando el tiempo de retardo entre pistas.

Unos años más tarde, se crearían unidades con varios cabezales de reproducción, de manera que el usuario podría controlar las longitudes y la cantidad de repeticiones guiando las cintas y los cabezales.

Una de las unidades más famosas en las siguientes décadas fue el *Maestro EchoFlex EP-3* (figura 3.41) empleada por artistas de la altura de *Jimmy Page (Led Zeppelin)* o *Brian May (Queen)*.



Figura 3.41: *Maestro EchoFlex EP-3*

Décadas después, la llegada de los delays digitales permitían un control mucho más fiable de la cantidad de repeticiones, la longitud de los retardos, e incluso del volumen de las repeticiones, asemejándose cada vez más al fenómeno natural del eco.

### 3.3.2 Implementación: integrado PT2399

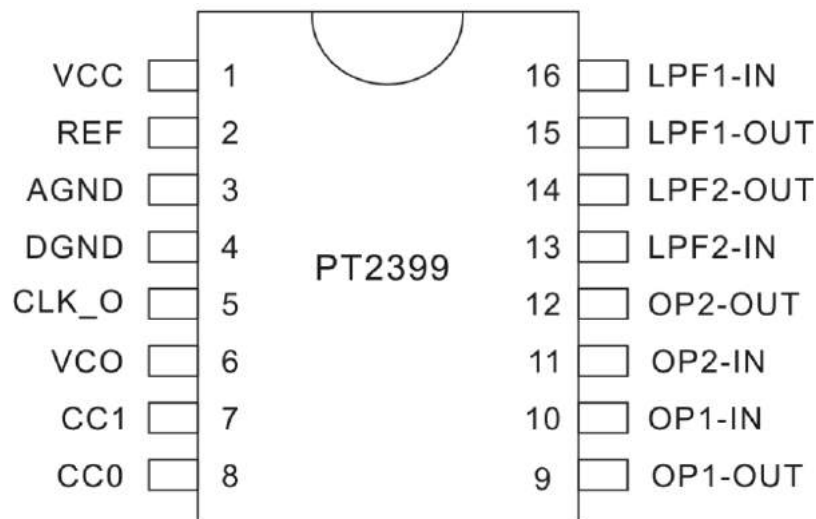
Para la implementación del efecto de *Delay* se ha escogido el integrado PT2399 (figura 3.42), debido a que:

1. Es muy comúnmente utilizado en pedales.
2. Funciona con una alimentación de 5V.
3. No requiere de otros integrados para producir el efecto.
4. Nos permitirá dos funciones, una de *Delay* y otra de *Echo*.

La función *Delay* retarda una sola vez la señal original.

La función *Echo* retarda un número determinado de veces la señal original.

5. Nos permitirá variar el tiempo de retardo mediante un potenciómetro.



Pin Name	I/O	Description	Pin No.
VCC	-	Analog supply voltage input	1
REF	-	Analog reference voltage (1/2VCC)	2
AGND	-	Analog ground	3
DGND	-	Digital ground	4
CLK_O	O	System clock output pin	5
VCO	I	VCO Frequency adjustment	6
CC1	-	Current control 1	7
CC0	-	Current control 0	8
OP1-OUT	O	OP amplifier 1 input/output. This pin can be used as modulated/Demodulated integrator by connecting capacitor	9
OP1-IN	I	OP Amplifier 2 input/output. This pin can be used as	10
OP2-IN	I	Modulated/Demodulated Integrator by connecting Capacitor	11
OP2-OUT	O		12
LPF2-IN	I	Low pass filter 2 input/output pin	13
LPF2-OUT	O		14
LPF1-OUT	O	Low pass filter 1 input/output pin	15
LPF1-IN	I		16

Figura 3.42: Pines PT2399(tomado de [11])

Las hojas de características nos proporcionan dos circuitos de aplicación, uno para conseguir un efecto de *Delay*, y otro para un efecto de *Echo*. La diferencia entre los dos efectos es que en el caso del delay la señal de salida sólo se repetirá una vez con el retardo deseado, y el efecto de echo hará que la señal de salida se repita un número determinado de veces.

Nuestro diseño se basará principalmente en los circuitos expuestos en las hojas de características, con lo que en un primer lugar tendremos que analizarlos.

### 3.3.2.1 Circuito de *Delay*

Esquema tomado de las hojas características para conseguir la funcionalidad de *Delay* (figura 3.43):

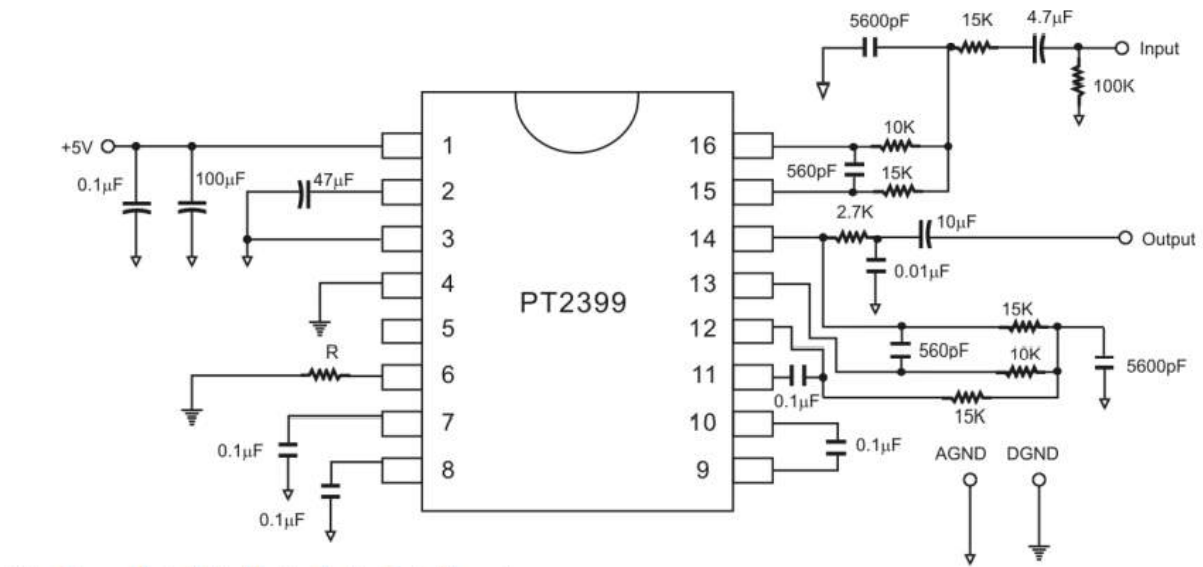


Figura 3.43: Circuito *Delay* (tomado de [11])

### 3.3.2.2 Circuito de *Echo*

El esquema tomado de las hojas características para conseguir la funcionalidad de *Echo* es el mostrado en la figura 3.44.

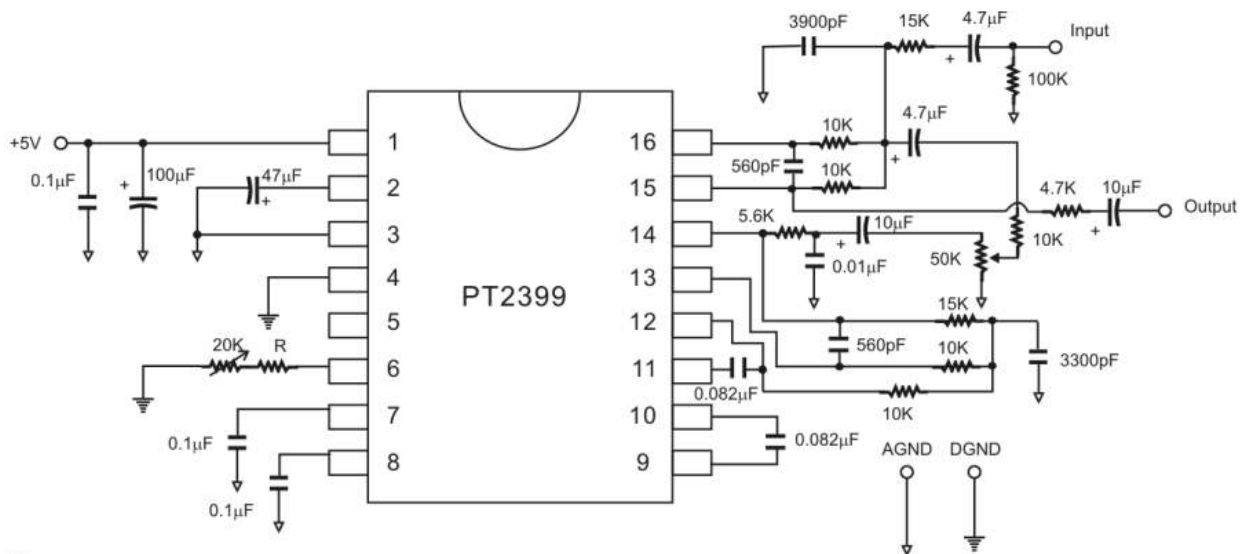


Figura 3.44: Circuito *Echo*(tomado de [11])

Como podemos observar, los dos circuitos son bastante similares, con la única diferencia de un cambio en la patilla de salida, y una rama que conecta las patillas 14 y 16.



En las hojas características se nos proporciona un diagrama de bloques que indica las conexiones internas del integrado (figura 3.45).

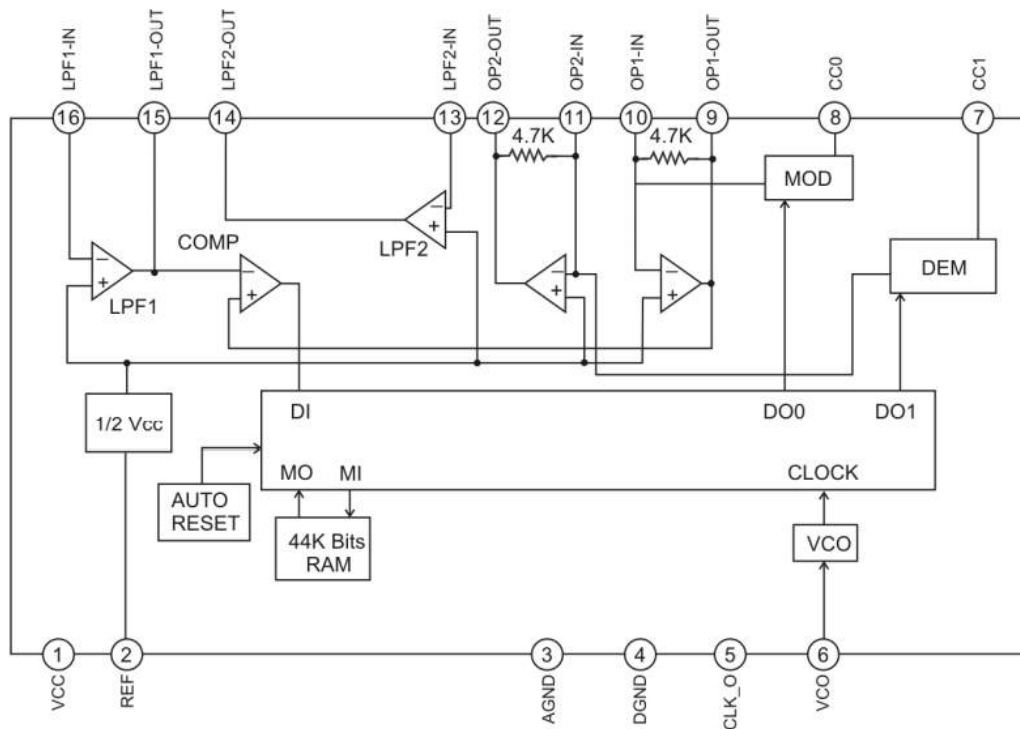


Figura 3.45: Conexiones internas PT2399(tomado de [11])

En cierta medida este diagrama puede confundir un poco, de manera que vamos a representarlo de la forma mostrada en la figura 3.46.

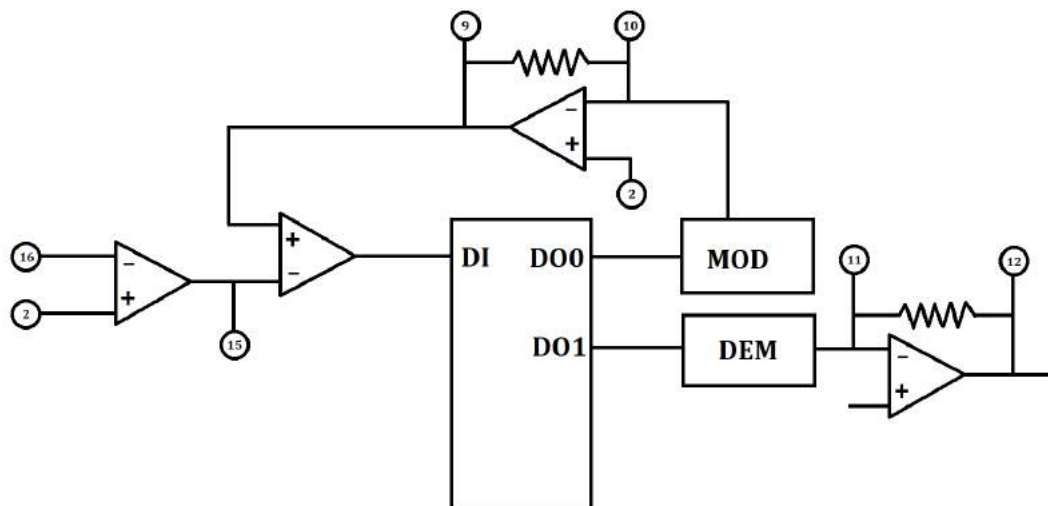


Figura 3.46: Esquema simplificado PT2399

Una vez simplificado el diagrama de las hojas características, podemos analizar los circuitos correspondientes a las configuraciones de las funciones *DELAY* y *ECHO* (figuras 3.47 y 3.48).

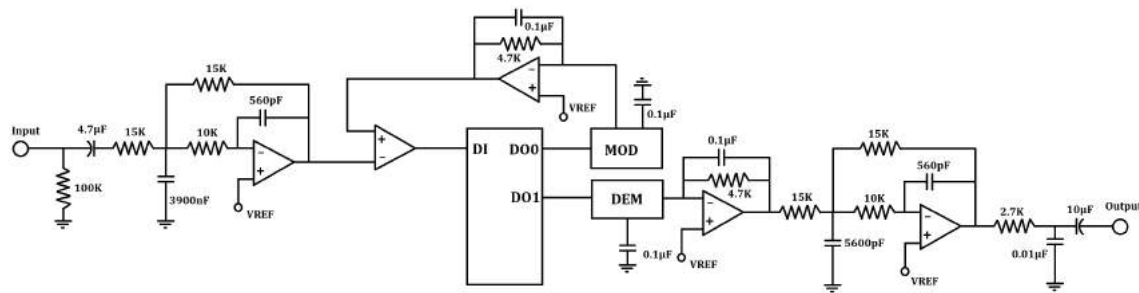
**Configuración Delay:**

Figura 3.47: Delay datasheet

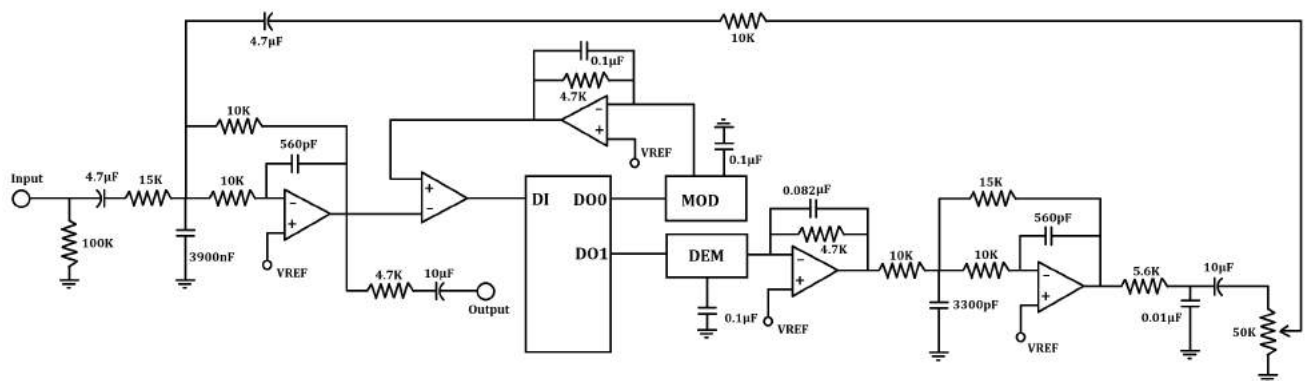
**Configuración Echo:**

Figura 3.48: Echo datasheet

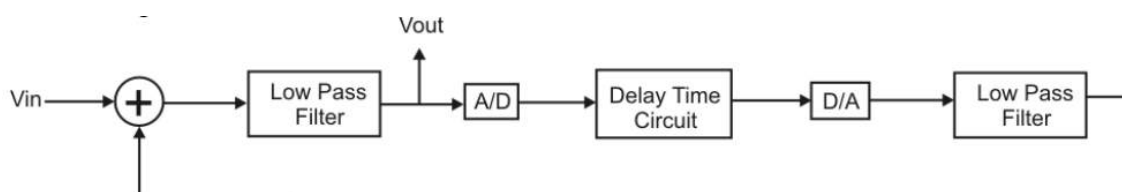
Como se ha comentado anteriormente, las dos configuraciones son muy similares. Comparten la misma etapa de entrada y de retardo. La única diferencia es la rama de realimentación que tiene la configuración *ECHO*, que es la que precisamente producirá el retardo repetitivo de la señal de entrada.

**3.3.3 Funcionamiento interno**

Nos encontramos con que las hojas de características no son demasiado detalladas acerca del funcionamiento del integrado, y con que tampoco existe una documentación que profundice lo suficiente en Internet, con lo que la tarea de comprender el funcionamiento del mismo resultó algo complicada.

Si bien hay partes que sí que se han podido entender bien, e incluso simular, hay otras en las que no ha sido posible, y cuya explicación se basa en suposiciones razonables sobre el mismo.

El primer paso fue comparar el siguiente diagrama proporcionado por las hojas de características (figura 3.49), con el circuito del modo *ECHO*.

Figura 3.49: Esquema de la configuración *Echo* (tomado de [11])

Con este esquema ya podemos diferenciar las dos partes claras que componen el circuito, primero los filtros paso bajo, y la etapa de conversión y retardo (figura 3.50).

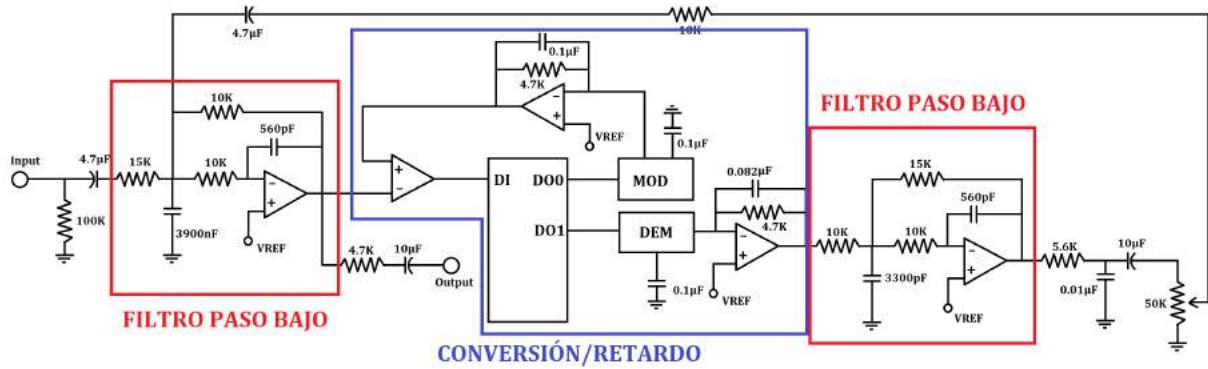


Figura 3.50: Partes del circuito *ECHO* (basado en [11])

A continuación se va a analizar más en profundidad las diferentes etapas de ambas configuraciones.

### 3.3.4 Filtro paso bajo (entrada)

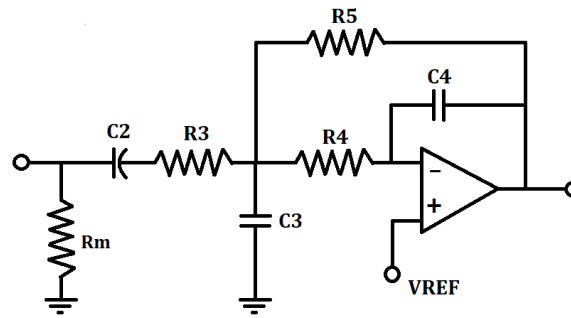


Figura 3.51: Circuito del filtro de entrada del efecto de *delay*

El objetivo de esta etapa de entrada es aplicar un filtro a la señal procedente de la guitarra, basado en el circuito de la figura 3.51.

La resistencia  $R_m$  sirve para tener un impedancia de entrada alta, así que tomaremos el valor de  $100k\Omega$  como referencia, pero se podría utilizar un valor incluso mayor.

El condensador **C2** se coloca para eliminar cualquier componente continua de la señal de entrada. Además, habrá que escoger un valor adecuado, ya que formará un filtro paso alto a una frecuencia igual:

$$f_c = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 15k\Omega \cdot C2} \quad (3.56)$$

Con un condensador de, por ejemplo,  $4,7\mu F$ , tendremos una frecuencia de corte de alrededor de  $2Hz$ .

**C2 = 4.7uF**

A partir de aquí la configuración es conocida como retroalimentación múltiple. Esta configuración presenta una respuesta plana en la banda pasante, lo que significa que la ganancia se mantendrá constante hasta la frecuencia de corte.



Esto resulta interesante para esta aplicación, ya que no deseamos en ningún momento que varíe la ganancia, así que este filtro nos asegurará que la señal de salida del filtro será igual a la de entrada hasta una cierta frecuencia, a partir de la cual se producirá la atenuación que imponga el filtro. Con esta configuración nos encontraremos con el siguiente comportamiento de la parte de realimentación múltiple (figura 3.52).

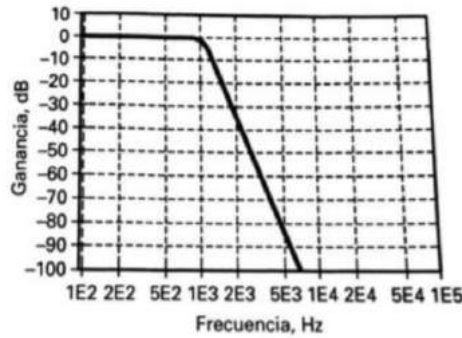


Figura 3.52: Diagrama de bode realimentación múltiple (tomado de [12])

La pendiente de la banda de transición será más pronunciada dependiendo del orden de la configuración (figura 3.54). La configuración presentada es de 2º orden, y para nuestra aplicación es suficiente, sin embargo, sería muy sencillo aumentar el orden, usando esquemas como los de la figura 3.53.

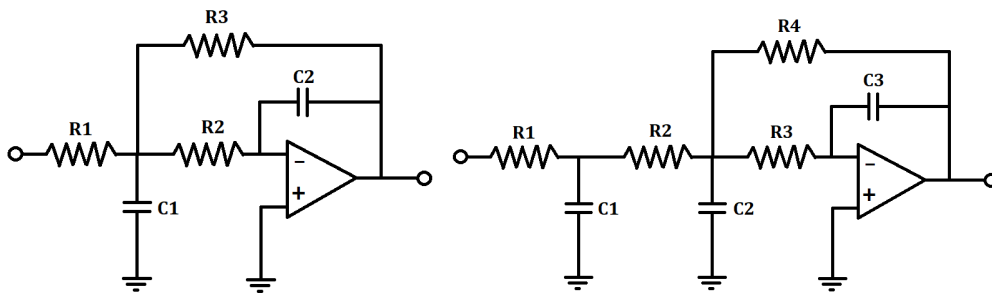


Figura 3.53: Circuito de realimentación múltiple de orden 2 (izq) y 3 (drch) (basado en [12])

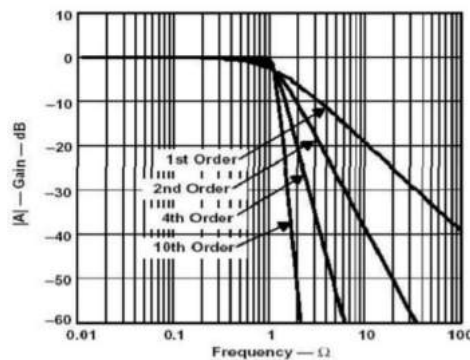


Figura 3.54: Diagrama de bode de realimentación múltiple aumentando el orden (tomado de [12])

Mencionar en este punto que, a diferencia de la configuración de la figura 3.53, en nuestro diseño deberemos polarizar la señal a la entrada del amplificador operacional, debido a que la señal procedente de la guitarra puede tomar valores negativos, y la alimentación que le proporcionamos a los operacionales es asimétrica. Si recordamos, esto también sucedió en el diseño del efecto de distorsión.

Las expresiones que nos permitirán establecer los valores de las resistencias y los condensadores de esta configuración son las siguientes:

### Función de transferencia

$$F(s) = \frac{\frac{-R3}{R1}}{1 + wc \cdot C2 \cdot (R3 + R2 + \frac{R3 \cdot R2}{R1} \cdot s + wc^2 \cdot C1 \cdot C2 \cdot R3 \cdot R2 \cdot s^2)} \quad (3.57)$$

### Ganancia:

$$A0 = \frac{-R3}{R1} \quad (3.58)$$

Para nuestra aplicación, tendremos que buscar una frecuencia de corte de entre  $8ky11kHz$ . Aunque no sea un valor crítico, ese rango es bueno como referencia.

Para facilitar el diseño, esta estructura nos permite, si establecemos todas las resistencias iguales, que la frecuencia de corte quede:

$$C = \frac{1}{w \cdot R} \quad (3.59)$$

Para el resto de condensadores, esta estructura nos proporciona una tabla de coeficientes (figura 3.55) que siguen la siguiente expresión dependiendo del orden del filtro:

$$Cn = Kn \cdot C \quad (3.60)$$

Orden	K1	K2	K3	K4	K5	K6	K7
1	1						
2	2.12	0.47					
3	2.37	2.59	0.32				
4	3.19	0.25	1.62	0.61			
5	2.16	4.31	0.21	1.85	0.54		
6	5.79	0.17	2.12	0.47	1.55	0.64	
7	2.1	6.05	0.15	2.4	0.41	1.66	0.6

Figura 3.55: Tabla de coeficientes (tomado de [12])

Si nos fijamos en los circuitos de las hojas de características (figuras 3.43 y 3.44), para esta configuración son valores habituales para las resistencias  $10k\Omega$  y  $15k\Omega$ . Para simplificar inicialmente consideraremos que todas las resistencias tienen un valor de  $15k\Omega$ , y que queremos una frecuencia de corte de  $10kHz$ :

$$R3 = R4 = R5 = 15k\Omega$$

$$C = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot fc \cdot R} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 10kHz \cdot 15k\Omega} = 1,06nF \quad (3.61)$$

En nuestro caso estableceremos de momento un orden 2 en el filtro, por lo que emplearemos una K1 de 2.12 y una K2 de 0.47. En nuestro caso C3 será el condensador del primer grado, y C4 del segundo grado:

$$C3 = K1 \cdot C = 2,25nF \quad (3.62)$$

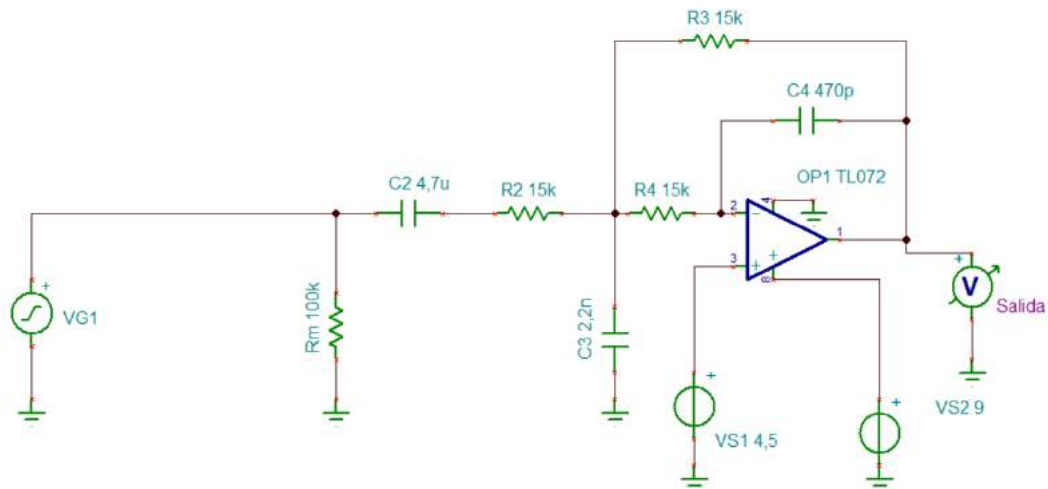
$$C4 = K2 \cdot C = 500pF \quad (3.63)$$

Pasando a valores estandarizados:

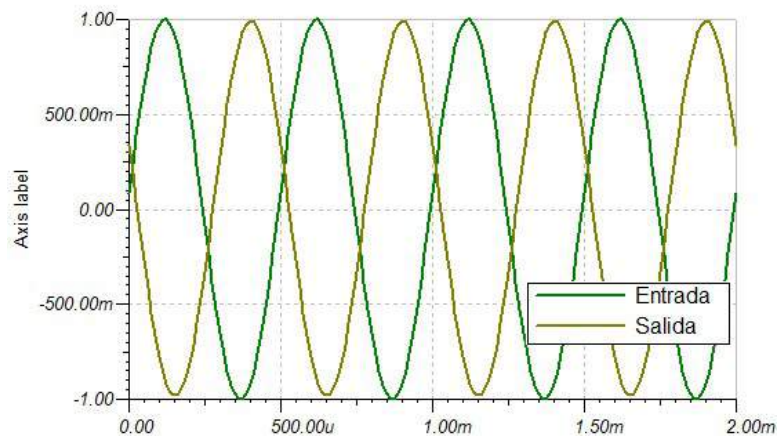
$$C3 = 2.2nF$$

$$C4 = 470pF$$

## 3.3.4.1 Simulaciones

Figura 3.56: Simulación de la etapa de filtro de entrada del efecto de *delay*

Primero comprobaremos el comportamiento al introducir al circuito una señal sinusoidal de  $1V_{pp}$  y de frecuencia  $1kHz$ . En teoría, la señal de salida debería ser la misma que la de entrada pero desfasada, debido a que la ganancia del circuito en la configuración de la figura 3.56 es de -1.

Figura 3.57: Señales de la etapa entrada del efecto de *delay*

En la figura 3.57 podemos comprobar que obtenemos un resultado acorde al esperado, la señal de salida mantiene la amplitud de la de entrada, y se desfasa debido al carácter inversor de la configuración del circuito.

También nos damos cuenta que, al contrario que en la teoría, no se consigue un desfase exacto de  $-180^\circ$  entre la señal de entrada y la de salida.

La primera teoría sería que el filtrado del circuito introduce un desfase, que provoca que el desfase de  $-180^\circ$  no sea constante, sino que dependa de la frecuencia de la señal de entrada.

Para reflejar esto, se va a simular la respuesta en frecuencia del sistema. En la figura 3.58 podemos

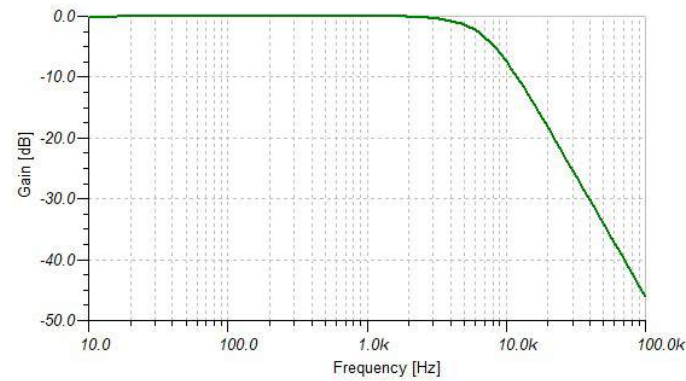


Figura 3.58: Diagrama de Bode de ganancia de la etapa de entrada del efecto de *delay*

comprobar que la ganancia se mantiene unitaria a lo largo de todo el ancho de banda, y que efectivamente el filtro es de segundo orden, ya que la pendiente a partir de la frecuencia de corte es de  $40dB/dec$

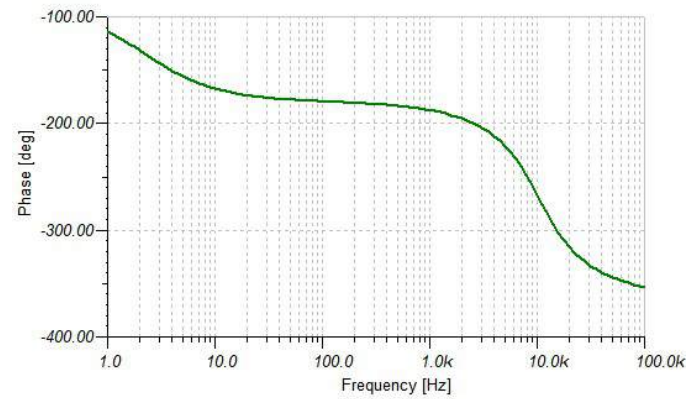


Figura 3.59: Diagrama de Bode de fase de la etapa entrada del efecto de *delay*

En la figura 3.59 podemos comprobar lo que se comentó anteriormente, el desfase de  $-180^\circ$  no es constante en el ancho de banda.

### 3.3.4.2 Especificaciones del diseño

Son las mostradas en la tabla 3.7.

Componente	Valor/Tipo
R3	$15k\Omega$
R4	$15k\Omega$
R5	$15k\Omega$
C2	$4,7\mu F$
C3	$2,2nF$
C4	$470pF$
AMP1	TL072

Tabla 3.7: Parámetros del filtro de entrada del efecto de *delay*

## 3.3.5 Conversión/Retardo

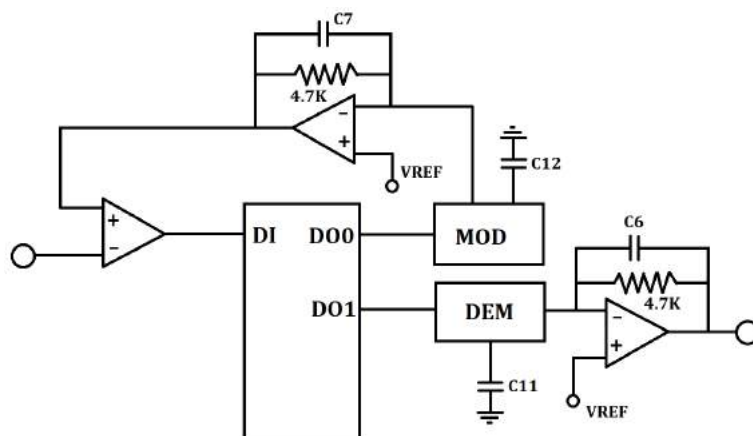


Figura 3.60: Esquema de la etapa de conversión y retardo del efecto de *delay* (basado en [11])

Esta fue la parte que resultó más difícil de comprender de todo el circuito, puesto que los esquemas no aportan demasiada información.

Lo que se sabe de inicio es que en la etapa de la imagen 3.60 ocurren 3 procesos:

1. Conversión analógico-digital (ADC) de la señal de entrada (patilla DI y DO0).
2. Registro de los datos digitales en la memoria de 44K que tiene el integrado, y salida de los mismos una vez se haya completado el retardo.
3. Conversión digital-analógico (DAC) de la salida retardada (patilla DO1).

La parte del ADC recuerda, en cierta medida, a una configuración delta-sigma, como la de la figura 3.61.

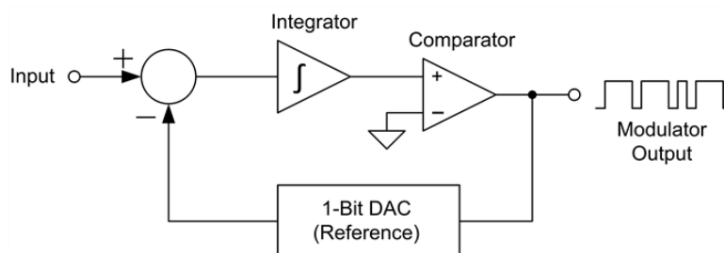


Figura 3.61: Modulación *Delta Sigma delay* (tomado de [13])

Uno de los factores que han llevado a esta suposición es el hecho de que el integrador incluya 2 operacionales con una resistencia fija en realimentación negativa, polarización al mismo voltaje de referencia que el resto del circuito. Tanto en la configuración de *DELAY* como en la de *ECHO* se incluyen los condensadores C6 y C7, y en las hojas características indica expresamente que dichos condensadores son opcionales sólo si se desea un integrador en las conversiones.

El hecho de que estos condensadores no fueran incluidos de serie, llevó a pensar que tanto el DAC de la modulación *Delta-Sigma*, como de la demodulación, tienen su salida en corriente, y que los operacionales están colocados ahí para que la salida sea en corriente, como en la figura 3.62.

Esto también podría explicar la colocación de los condensadores C11 y C12, puesto que podrían resultar los condensadores de alimentación de los DACs, y que esas patillas de serie no vengán conectadas a ningún sitio, ya que se puede desear una alimentación simétrica o asimétrica.

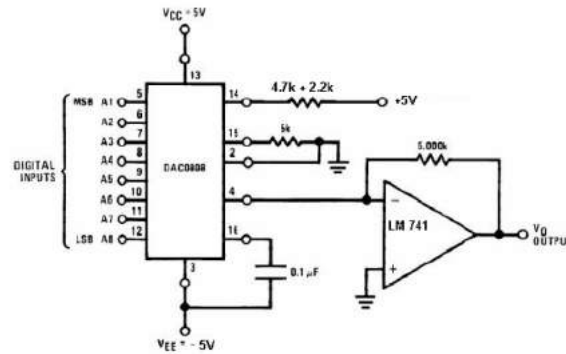


Figura 3.62: Ejemplo de DAC con salida en tensión (tomado de [14])

De esta manera, se presupone que la señal de la guitarra, una vez filtrada a la entrada, pasa por el ADC *Delta Sigma*, el cuál va almacenando en la memoria de 44KB la señal convertida, a una velocidad proporcional a la frecuencia de reloj configurable del integrado (patilla VCO), y que una vez se han almacenado todos los datos se convierte de nuevo a analógico la señal original, y se resetea la memoria.

Esto explicaría por qué el potenciómetro con el que se controla el retardo esté asociado según las hojas de características a la frecuencia de reloj, a más frecuencia de reloj más rápido se convertirán los datos, y antes se retardarán y a menos frecuencia este proceso será más lento, y habrá más retardo. Debido a que todo esta explicación es mera suposición, los valores de los componentes de esta parte serán tomados de los circuitos propuestos en las hojas características, puesto que se considera que serán buenos valores para que esta etapa funcione correctamente.

### 3.3.5.1 Especificaciones del diseño

Son las mostradas en la tabla 3.8.

Componente	Valor/Tipo
C6	82nF
C7	82nF
C11	0,1µF
C12	0,1µF

Tabla 3.8: Parámetros etapa de retardo y conversión del efecto de *delay*

### 3.3.6 Etapa de filtrado intermedia

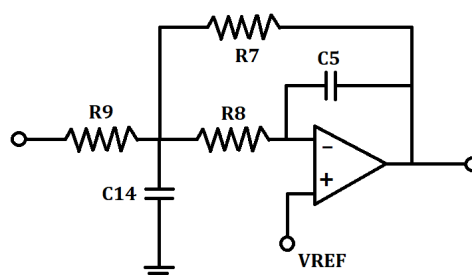


Figura 3.63: Circuito del filtrado intermedio del efecto de *delay*

La configuración de la figura 3.63 es la misma presentada a la entrada del sistema (figura 3.53). para simplificar el diseño, se tomarán los mismos valores que en la entrada.

### 3.3.6.1 Especificaciones del diseño

Son las mostradas en la tabla 3.9.

Componente	Valor/Tipo
R7	$15k\Omega$
R8	$15k\Omega$
R9	$15k\Omega$
C5	$470pF$
C14	$2,2nF$
AMP2	TL072

Tabla 3.9: Parámetros de la etapa de filtrado intermedia del efecto de *delay*

### 3.3.7 Referencia de tensión

De forma análoga al efecto de distorsión (figura 3.37), tendremos que utilizar una referencia de tensión para polarizar la señal procedente de la guitarra.

#### 3.3.7.1 Especificaciones del diseño

Son las mostradas en la tabla 3.10.

Componente	Valor/Tipo
Ra	$10k\Omega$
Rb	$10k\Omega$
Ca	$47\mu F$
Cb	$47\mu F$

Tabla 3.10: Parámetros de la referencia de tensión del efecto de *delay*

### 3.3.8 Alimentación regulada

Debido a que el integrado PT2399 necesita una alimentación de 5V, necesitaremos obtener ese voltaje de la alimentación de 9V del circuito. Para ello, utilizaremos el regulador 78L05 (figura 3.64).

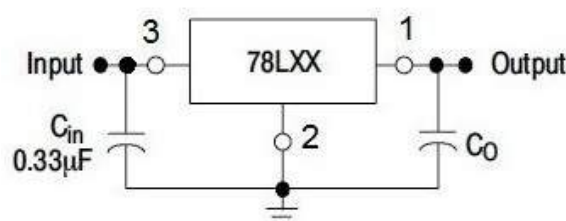


Figura 3.64: Alimentación regulada del efecto de *delay*(tomado de [15])

### 3.3.9 Efecto de echo

Si nos fijamos atentamente, los circuitos de Delay y Echo son muy parecidos, a diferencia de que este último tiene una realimentación hacia la entrada del circuito, junto con un potenciómetro a la salida. Con esta configuración, se consigue que después de que la señal original haya sido retardada, vuelva al circuito de retardo y vuelva a ser retardada. En los pedales de Delay esta configuración se emplea para conseguir un número determinado de repeticiones de la entrada.

Esta es la función principal del potenciómetro conectado a la salida del circuito, puesto que nos permite configurar el porcentaje de ganancia de la señal de salida que volverá de nuevo al circuito. De esta forma, el número de repeticiones no será más que una iteración de esa ganancia, que siempre será inferior a 1. Vamos a poner un ejemplo para aclarar todo esto. Consideremos que con una ganancia inferior al 10 % el oído humano ya no detecta la salida de audio del efecto, probemos con las siguientes iteraciones de ganancia:

**Potenciómetro 90 %:**

1 → 0,9 → 0,81 → 0,73 → 0,66 → 0,59 → 0,53 → 0,47 → 0,43 → 0,39 → 0,35 → 0,31 → 0,28 → 0,25 →  
0,23 → 0,21 → 0,19 → 0,17 → 0,15 → 0,13 → 0,12 → 0,11 → 0,10

**23 Repeticiones**

**Potenciómetro 70 %:**

1 → 0,7 → 0,49 → 0,34 → 0,24 → 0,17 → 0,121 → 0,08

**7 Repeticiones**

**Potenciómetro 30 %:**

1 → 0,3 → 0,09

**3 Repeticiones**

### 3.3.10 Modificaciones extras

#### 3.3.10.1 Control de volumen de las repeticiones

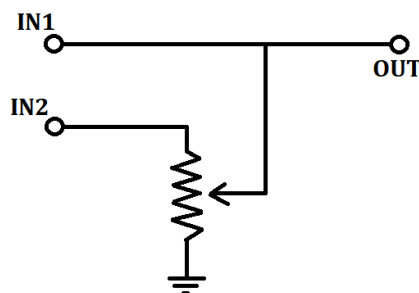


Figura 3.65: Control de volumen del efecto de *delay*

Un gran número de pedales de *Delay* permiten configurar el volumen de la señal retardada, consiguiendo que se escuche la señal original junto con la señal anterior retardada.



Esto lo tendremos que hacer con un potenciómetro, sin embargo, tendremos que modificar un poco nuestro diseño actual, puesto que en éste no podríamos conseguir que el volumen de las repeticiones permanecieran constante en todas ellas, ya que la señal retardada entra directamente otra vez en el circuito de retardo.

Para ello, deberemos tener dos ramas en la salida, como las mostradas en la figura 3.65, una con la señal actual, y otra con la salida del circuito, justo después del potenciómetro de repeticiones.

### 3.3.10.2 Control del tiempo de retardo

**TABLE 1: VCO FREQUENCY VS DELAY TIME**

<b>R</b>	27.6K	21.3K	17.2K	14.3K	12.1K	10.5K	9.2K	8.2K
<b>fck</b>	2.0M	2.5M	3.0M	3.5M	4.0M	4.5M	5.0M	5.5M
<b>td</b>	342ms	273ms	228ms	196ms	171ms	151ms	136.6ms	124.1ms
<b>THD</b>	1.0%	0.8%	0.63%	0.53%	0.46%	0.41%	0.36%	0.33%

<b>R</b>	7.2K	6.4K	5.8K	5.4K	4.9K	4.5K	4K	3.4K
<b>fck</b>	6.0M	6.5M	7.0M	7.5M	8.0M	8.5M	9.0M	10M
<b>td</b>	113.7ms	104.3ms	97.1ms	92.2ms	86.3ms	81ms	75.9ms	68.1ms
<b>THD</b>	0.29%	0.27%	0.25%	0.25%	0.23%	0.22%	0.21%	0.19%

<b>R</b>	2.8K	2.4K	2K	1.67K	1.47K	1.28K	1.08K	894
<b>fck</b>	11M	12M	13M	14M	15M	16M	17M	18M
<b>td</b>	61.6ms	56.6ms	52.3ms	48.1ms	45.8ms	43ms	40.6ms	38.5ms
<b>THD</b>	0.18%	0.16%	0.15%	0.15%	0.15%	0.15%	0.14%	0.14%

<b>R</b>	723	519	288	0.5
<b>fck</b>	19M	20M	21M	22M
<b>td</b>	36.6ms	34.4ms	32.6ms	31.3ms
<b>THD</b>	0.14%	0.13%	0.13%	0.13%

Figura 3.66: Tabla del efecto de *delay* (tomado de [11])

Un parámetro muy importante que debe poderse configurar es el tiempo que se va a retardar la señal de entrada. Como podemos observar en las hojas de características del integrado (figura 3.66, nos indica que el retardo de la señal se puede configurar mediante el valor de una resistencia conectada en el pin VCO, y según la tabla mostrada en la figura 3.66.

Para asegurar el correcto funcionamiento del integrado, se nos especifica que como mínimo la resistencia deberá ser de  $1K\Omega$ , por lo tanto una posibilidad para este control sería colocar un potenciómetro de  $20K\Omega$  en serie con una resistencia de  $1K\Omega$  y conectado al pin VCO, como la configuración de la figura 3.67.

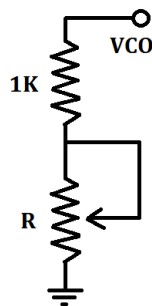


Figura 3.67: Control del efecto de *delay*

### 3.3.10.3 Buffers de entrada y salida

Como ya hemos visto en el efecto anterior, una implementación muy interesante es la de los *buffers* de entrada y salida, para garantizar la integridad de las señales a la entrada y salida del pedal.

Ésta vez, en vez de plantearlo con transistores, vamos a plantear los *buffers* con un amplificador operacional.

Para conseguir un buffer con un amplificador operacional, la forma más sencilla es conectarlo en una configuración de seguidor de tensión como la de la figura 3.68.

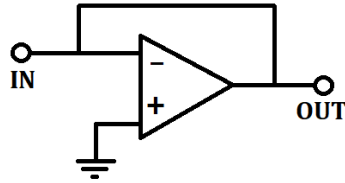


Figura 3.68: Seguidor de tensión

Sin embargo, en nuestra aplicación se nos plantean 2 problemas:

1. En el caso del *buffer* de entrada precisamos de una impedancia alta, y en el caso del de salida precisamos de una impedancia baja.
2. Nuestra señal de entrada al circuito es bipolar, así que deberemos polarizar el amplificador.

Para ello, podemos plantear la configuración mostrada en la figura 3.69.

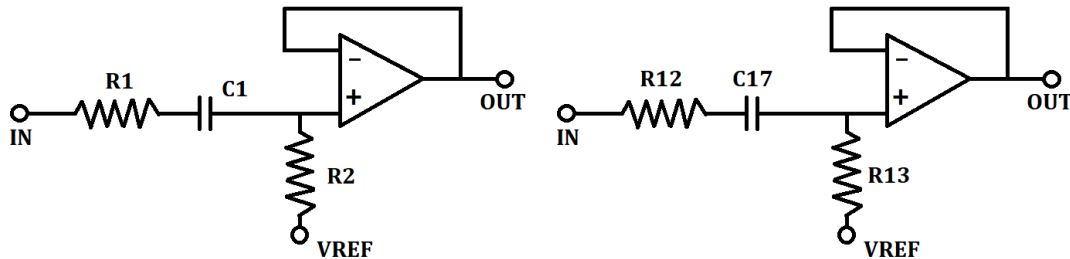


Figura 3.69: Circuito *Buffer* de entrada y salida del efecto de *delay*

Lo primero que deberemos hacer es establecer la impedancia de entrada que deseamos que tenga el *buffer* que, cómo hemos comentado, es conveniente que sea de al menos  $1M\Omega$ . La impedancia de entrada de esta configuración será:

$$Z_{in} = R1 + (R2 + Z_{VREF}) || Z_{in,TL072} \quad (3.64)$$

La impedancia de VREF hace referencia al circuito de divisor de tensión para conseguir la tensión VREF, en el que tendremos 2 resistencias en serie, por lo que la impedancia equivalente de esa parte sería el paralelo de esas 2 resistencias.

Como para el buffer de entrada la impedancia va a ser de alrededor de  $1M\Omega$ , y para la VREF usamos resistencias del orden de unos pocos  $k\Omega$ , no será necesario considerar esa impedancia. De la misma forma, podemos despreciar  $Z_{in,TL072}$  al ser demasiado elevada. Por lo tanto, resulta:

$$Z_{in} = R1 + R2 \quad (3.65)$$

Debido a que la  $R1$  se emplea para limitar la corriente de entrada, nos servirá un valor estándar de  $10k\Omega$  por ejemplo, por lo tanto podemos establecer  $R2 = 1M\Omega$ , y así conseguir una impedancia de entrada del sistema adecuada.

El condensador  $C1$  tendrá una doble función. La primera será eliminar la componente continua que entren de la guitarra, y la segunda establecer un primer filtro paso alto a la entrada al efecto para las frecuencias bajas no audibles, por ejemplo, de alrededor de  $5 - 20Hz$ :

$$5 < \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot C1 \cdot R2} < 15 \quad (3.66)$$

Despejando  $C1$ :

$$C1 = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot R2} \quad (3.67)$$

Sustituyendo en el rango de la ecuación 3.67:

$$C1 = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 5 \cdot 10^6 \Omega} = \mathbf{31.8 \text{ nF}} \quad (3.68)$$

$$C1 = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 15 \cdot 10^6 \Omega} = \mathbf{10.6 \text{ nF}} \quad (3.69)$$

$$\mathbf{31.8nF < C1 < 10.6nF} \quad (3.70)$$

Estableciendo un valor estándar:

$C1 = 33nF$

### Simulaciones:

Lo primero que se va a comprobar es que podemos obtener, con el mismo circuito, una impedancia de entrada muy elevada, y una impedancia de salida muy baja:

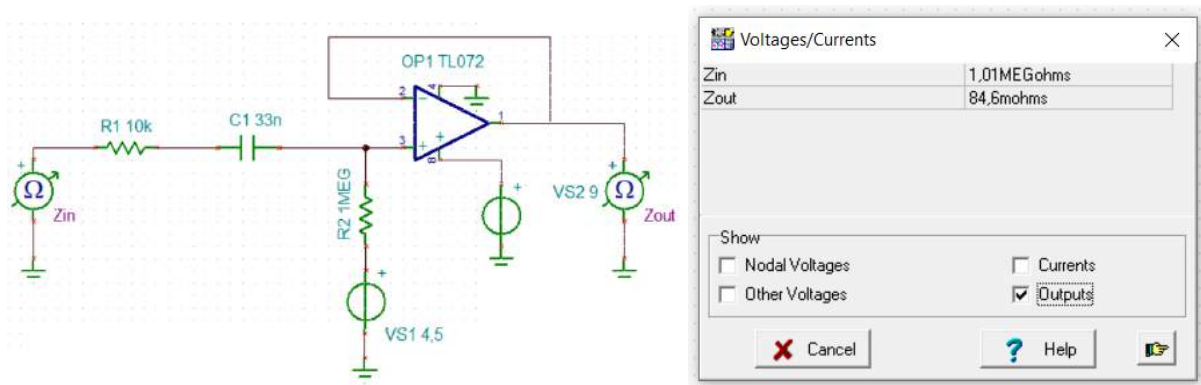


Figura 3.70: Simulación del *buffer* de entrada y salida del efecto de *delay*

Como puede comprobarse en la figura 3.70, el valor de la impedancia de entrada es lo suficientemente alto, y la de salida lo suficientemente baja.

Comprobamos ahora el comportamiento en frecuencia:

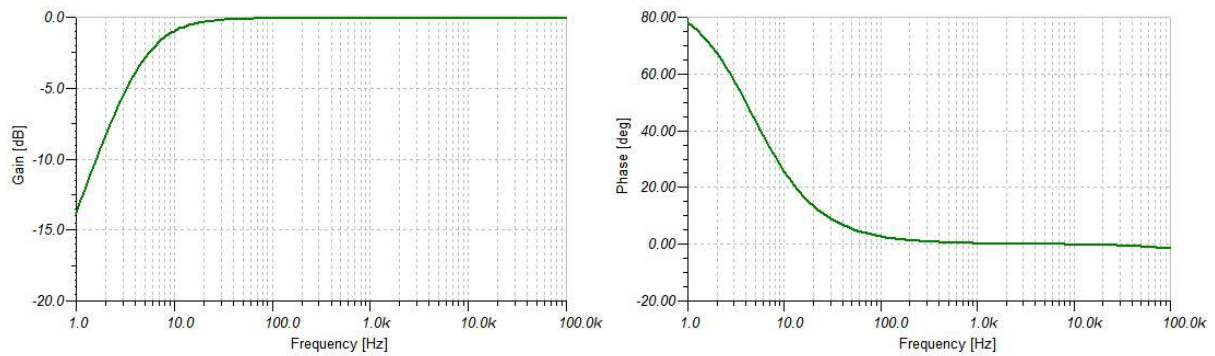


Figura 3.71: Diagrama de bode de los *buffers* de entrada y salida del efecto de *delay*

De los diagramas de la figura 3.71 podemos observar cómo se tiene un filtro paso alto que presenta:

- Un cero en  $0Hz$ .
- Un polo en  $\frac{1}{2 \cdot \pi \cdot C1 \cdot R2} = 4,8Hz$ .
- Una pendiente de  $20dB/dec$ .
- Un desfase de  $90^\circ$  en el cero, y un desfase de  $0^\circ$  en la zona en frecuencias medias.
- Una ganancia de  $0dB$  en el ancho de banda.

#### 3.3.10.4 Especificaciones del diseño

Son las mostradas en la tabla 3.11.

Componente	Valor/Tipo
R1	$10k\Omega$
R2	$1M\Omega$
R12	$10k\Omega$
R13	$1M\Omega$
C1	$33nF$
C17	$33nF$
AMP1	TL072
AMP2	TL072

Tabla 3.11: Parámetros del *buffer* de entrada y salida del efecto de *delay*



### 3.3.12 Diseño de la placa de circuito impreso (PCB)

Se ha empleado el software Fritzing [18] para hacer el esquema de conexiones del circuito (figura 3.73)

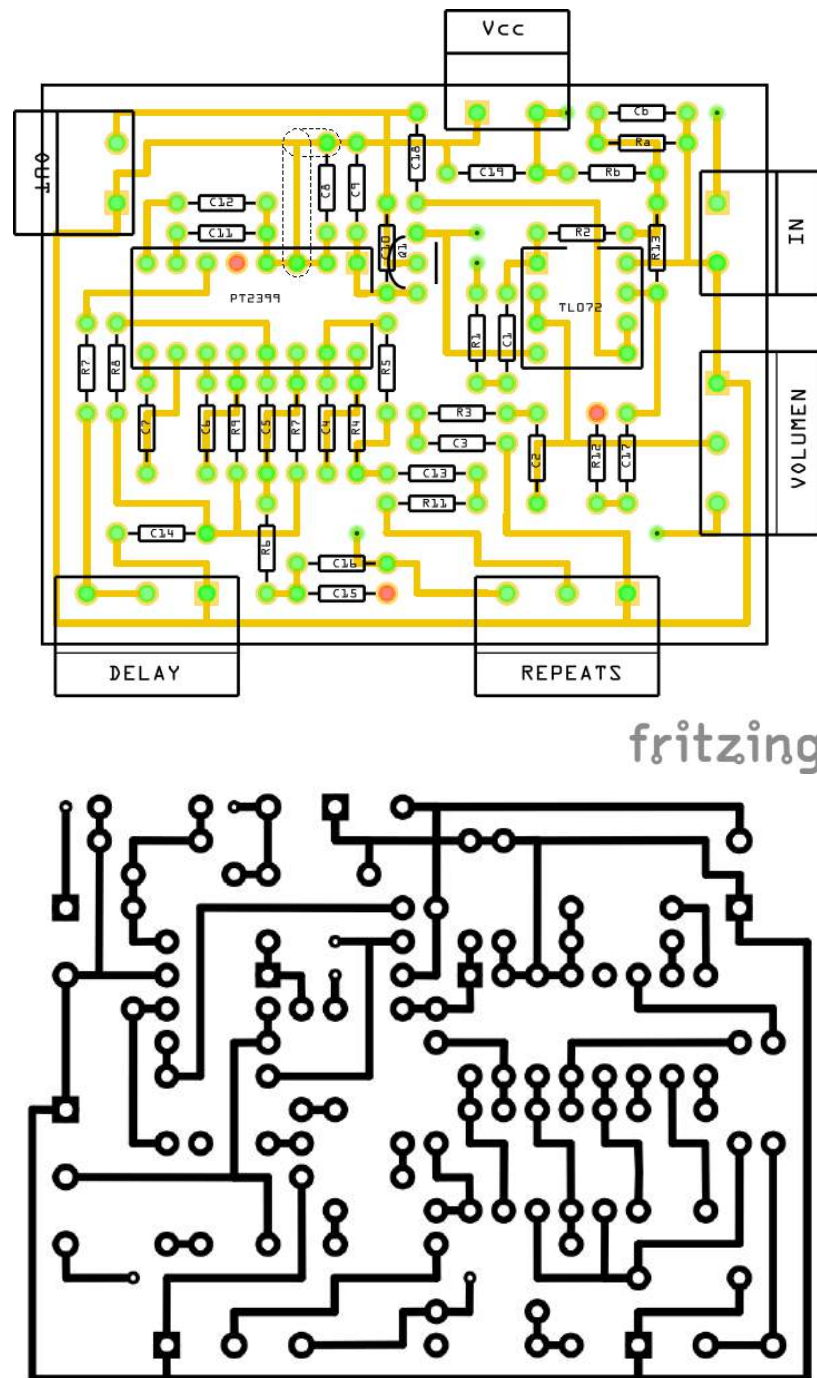


Figura 3.73: PCB del efecto de *delay*



### 3.3.13 Fabricación

Se ha fabricado el efecto de distorsión en una placa perforada (figura 3.74)

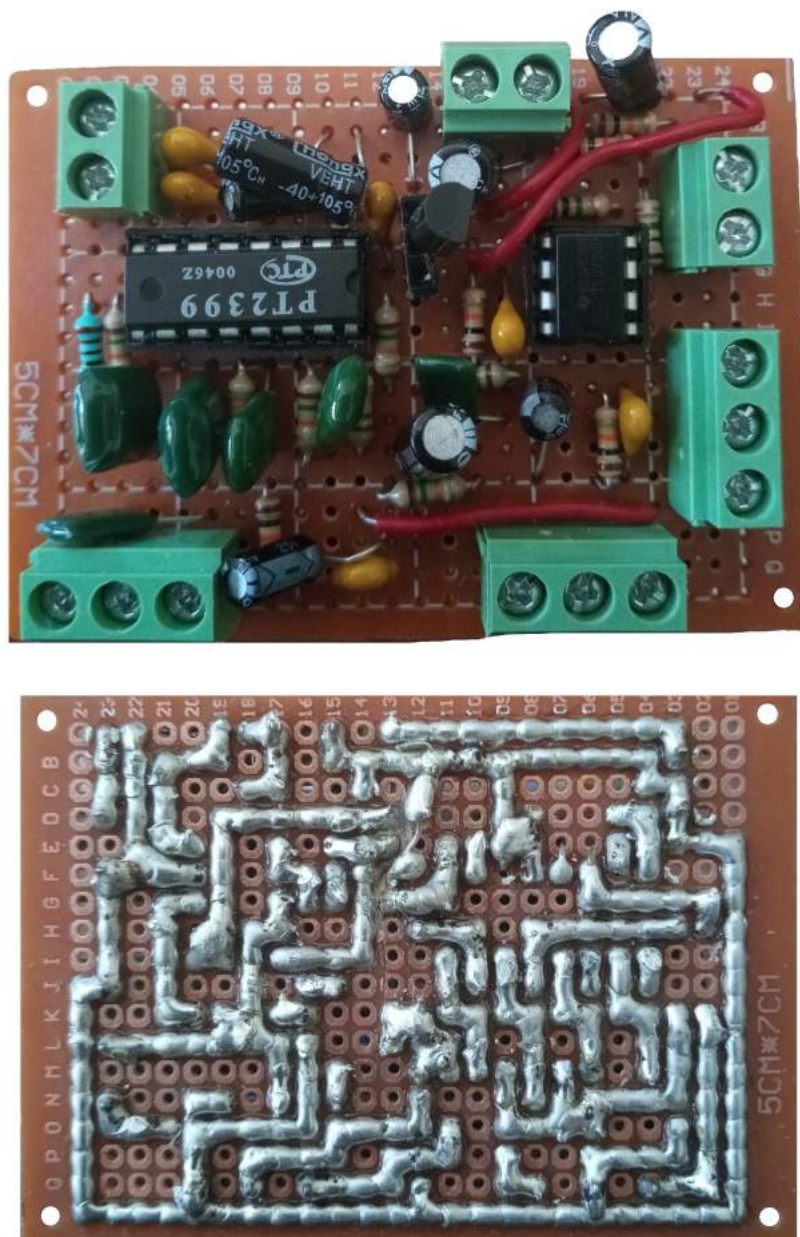


Figura 3.74: PCB placa del efecto de *delay* fabricada

## 3.4 Placa de alimentación

### 3.4.1 Especificaciones

Como ya se comentó anteriormente, un requisito inicial del proyecto es que el sistema tuviera alimentación incluida, que en nuestro caso deberá ser una batería de 9v. Para poder acoplarla al sistema, se estuvo buscando diferentes portabaterías, hasta encontrar el mostrado en la figura 3.75.



Figura 3.75: Batería y portabatería

Este portabaterías nos permite poder colocarlo de manera muy sencilla, ya sea o por encaje o empleando tornillos y, lo que es más importante, tener un acceso fácil y cómodo a la batería, de manera que si se quisiese cambiar simplemente es necesario abrir la tapa (figura 3.75)

Otro aspecto importante del sistema de alimentación a plantear es la posibilidad de activar y desactivar la alimentación. La manera sencilla será incorporar un switch, como se muestra en la figura 3.76.



Figura 3.76: Switch de alimentación

Se eligió este switch por dos razones principalmente, primero por la facilidad de encaje que tenía, y segundo por el led que incluye, el cuál resulta de gran utilidad para saber cuándo el sistema está alimentado y cuándo no.

Por último, sólo faltará diseñar la placa que nos permita conectar la batería, el switch, y la alimentación de los 4 efectos. Los únicos requisitos para el diseño serán que el switch deberá cortar la alimentación de los 4 efectos, y que cada una de las salidas deberá tener un condensador para filtrarla, como se muestra en la figura 3.77.

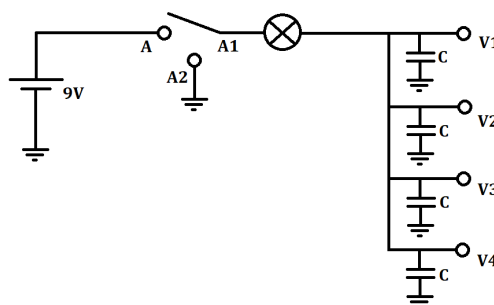


Figura 3.77: Circuito de alimentación



### 3.4.2 Diseño de la placa de circuito impreso (PCB)

Se ha empleado el software Fritzing [18] para hacer el esquema de conexiones del circuito (figura 3.78)

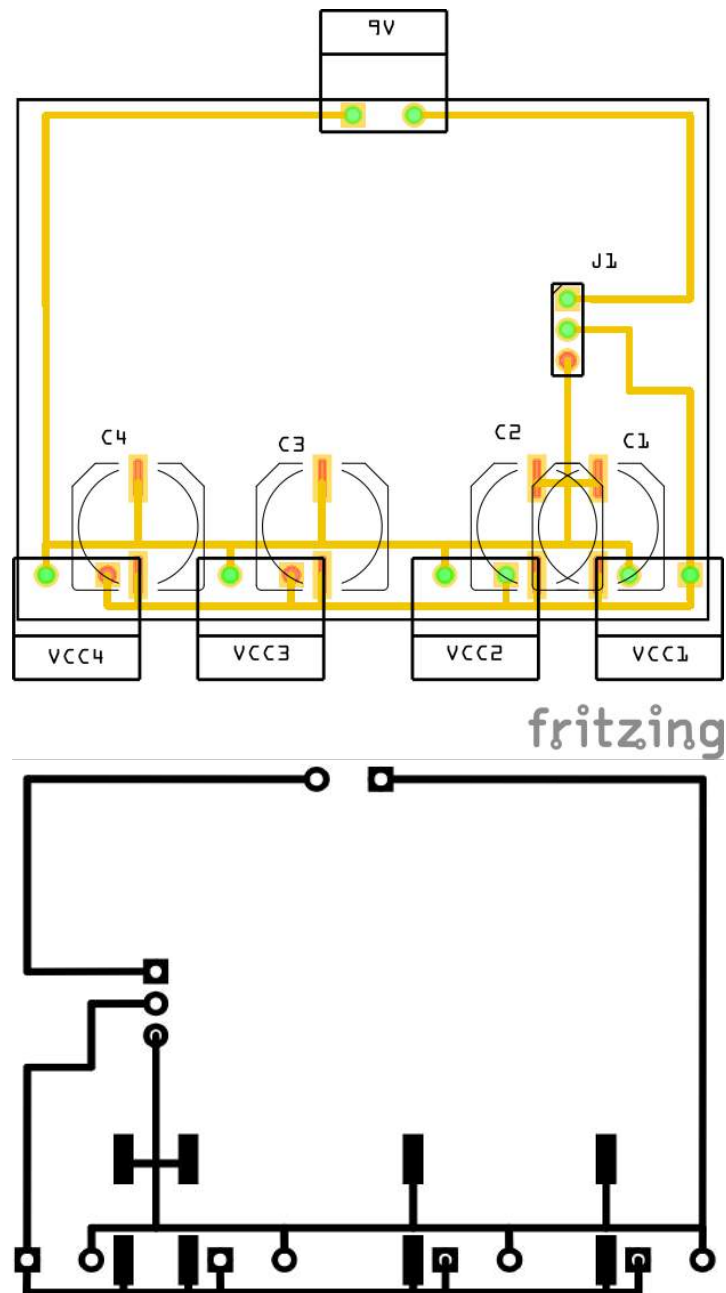


Figura 3.78: Placa alimentación PCB

### 3.4.3 Fabricación

Se ha fabricado el sistema de alimentación en una placa perforada (figura 3.79)

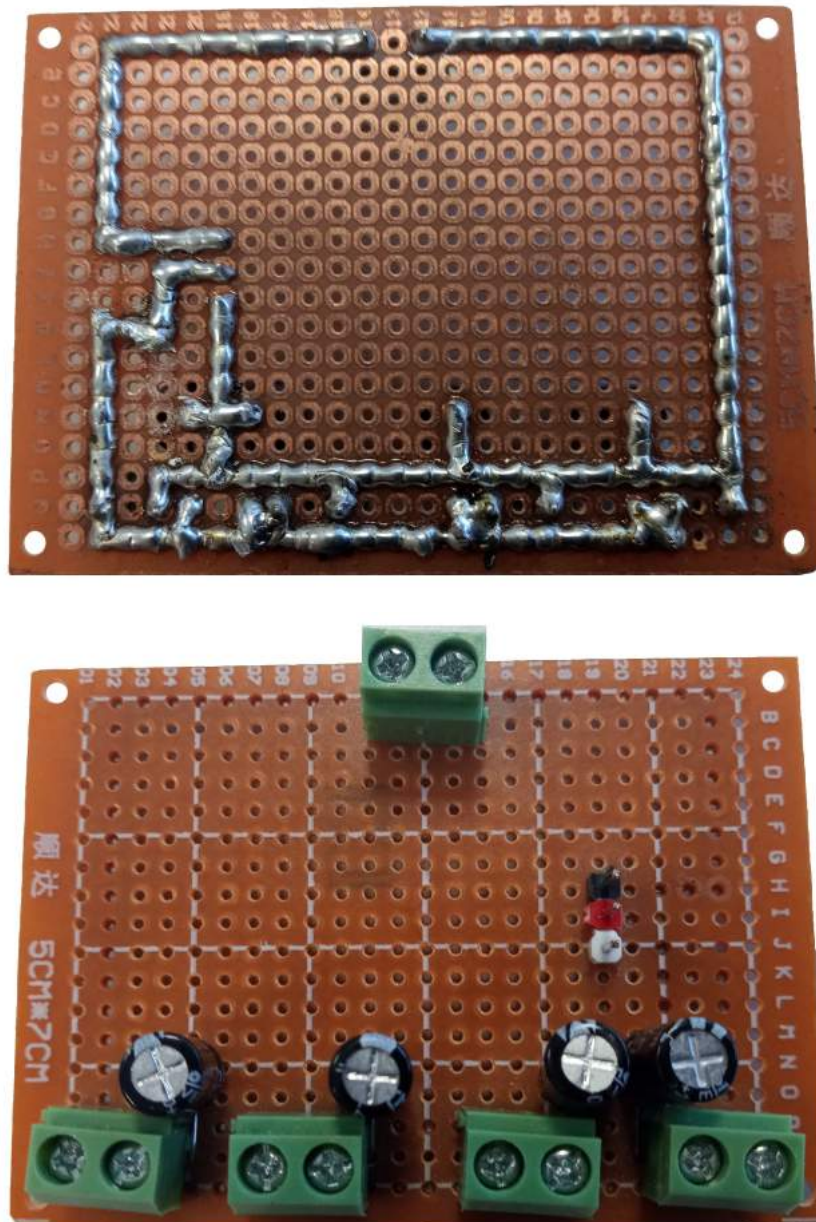


Figura 3.79: PCB placa selección fabricada

## 3.5 Placa de selección

### 3.5.1 Especificaciones

Uno de los objetivos principales de este proyecto es conseguir adaptar el sistema de activación que tienen los pedales convencionales por uno manual.

Para ello es necesario fabricar un sistema de selección que cumpla los siguientes especificaciones:

- La activación de cada efecto debe ser independiente del resto del sistema.

Esto quiere decir que, aunque los diferentes efectos deban ir conectados en cascada, se puedan desactivar el primero sin que eso afecte al resto de efectos sino que directamente transmita la señal original sin modificarlo.

- Se debe poder fabricar con switches de 2 posiciones y 6 pastillas.

Esto se podría considerar más una recomendación que un requisito, puesto que existen switches de 2 posiciones y 9 patillas, pero o bien por presupuesto o bien por facilidad de encontrarlo se ha optado por los de 6 patillas.

- Debe tener un carácter modular y en la medida de lo posible intuitivo. Debido a la cantidad de entradas y salidas que deberá tener este sistema (efectos, alimentación, jacks, switches) debe poder identificarse fácilmente cómo hacer las conexiones entre ellas.

Para ello, se intentará establecer a cada tipo de conexión un conector o jack diferente, y diseñar la placa con cierto orden, para que resulte intuitivo.

- Debe adaptarse el espacio para poderse fabricar en una placa perforada de 5x7cm

Establecidas las especificaciones del sistema, el primer paso será plantear el esquema de conexiones que deberá tener.

Si analizamos el tipo de conmutador que vamos a emplear, observamos que disponemos de 3 grupos de dos pines, de los cuales uno será el común, y la conmutación permitirá unir uno de los dos grupos con el común, tal y como se muestra en la figura 3.80.

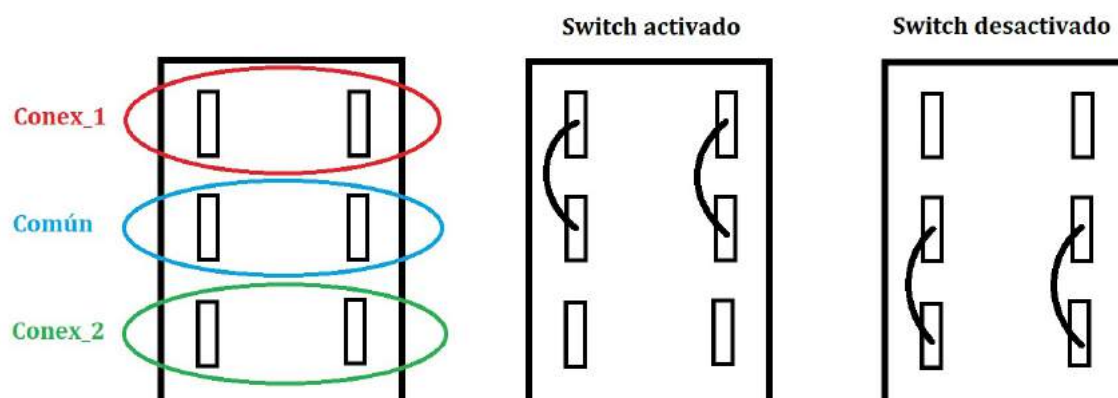


Figura 3.80: Pines por parejas del módulo de selección

Concluimos que el diseño del sistema debería comenzar por decidir qué entrada/salida irá conectado al conjunto de pines comunes.

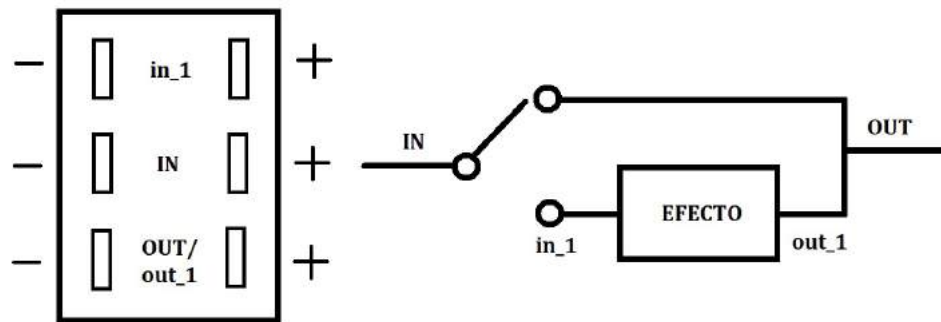


Figura 3.81: Conexión planteamiento 1 del módulo de selección

El sistema de la figura 3.81 no resultó efectivo, puesto que generaba ruido, al tener dos entradas conectadas a la misma salida.

Entonces se optó por mantener la misma entrada para el canal limpio y para el efecto, y conmutar entre esas 2 salidas, dejando la salida del sistema como señal común, tal y como se muestra en la figura 3.82.

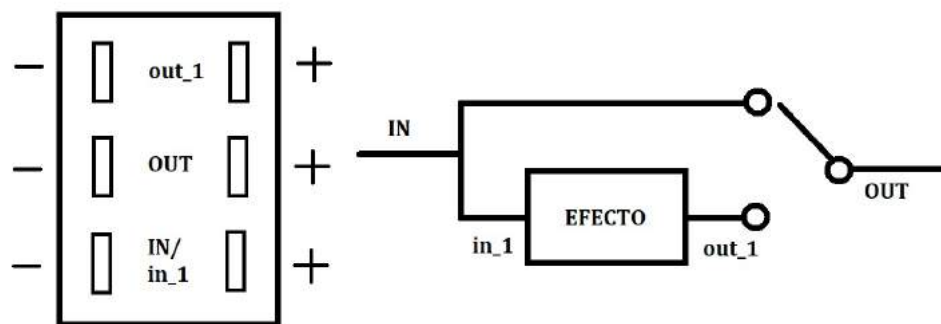


Figura 3.82: Conexión planteamiento 2 del módulo de selección

Este esquema resultó ser correcto, pero nos encontramos que seguía generando ruido indeseado. Se llegó a la conclusión que era producido por la alimentación del efecto. En estos dos planteamientos el efecto había permanecido siempre alimentado, pero ahora se debería tener que conmutar también.

La solución que se planteó fue destinar cada tipo de conexión de 3 pines, es decir, una para alimentación y otra para señal, considerando que luego en las conexiones del sistema final las masas de las señales deberían ir todas conectadas, ya que con este nuevo planteamiento solo se conmutarían las señales positivas, como lo mostrado en la figura 3.83.

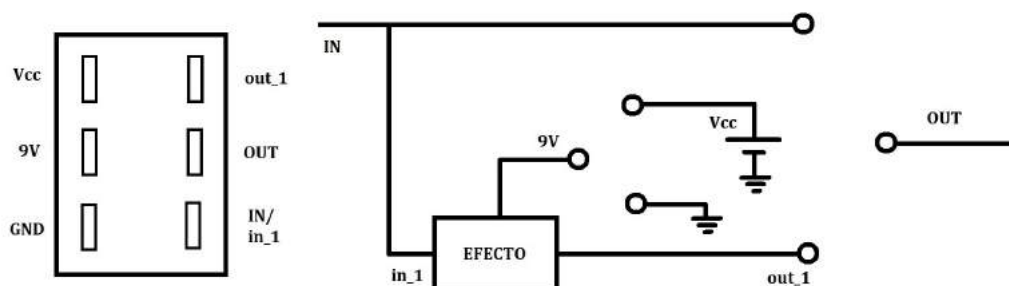


Figura 3.83: Conexión planteamiento final del módulo de selección

La conexión de 9V representaría la entrada de alimentación del pedal, y el VCC la salida de la batería que se emplee.

Es importante que se respete este esquema de conexiones para la alimentación, puesto que la alimentación debe conectarse cuando se conecte la salida del pedal, y desconectarse cuando se seleccione el canal limpio.

Si se cambiase el orden de los pines de alimentación, se podría provocar o que el efecto se active cuando se seleccione el canal limpio (generando ruido) y se desactive cuando se seleccione el efecto (contándose toda conexión) o en mayor medida un cortocircuito en la batería si se conectase sin querer VCC con GND.

Esta configuración se probó con un efecto aislado, y se consiguió el resultado que se esperaba, cuando el efecto no está activado se obtiene la señal original sin modificar, y cuando se activa la señal se obtiene modificada.

Ahora bien, para nuestro sistema se deben implementar 4 efectos, no sólo 1.

Para ello, simplemente conectaremos en cascada 4 veces el sistema de selección que hemos diseñado anteriormente, resultado el esquema de la figura 3.84.

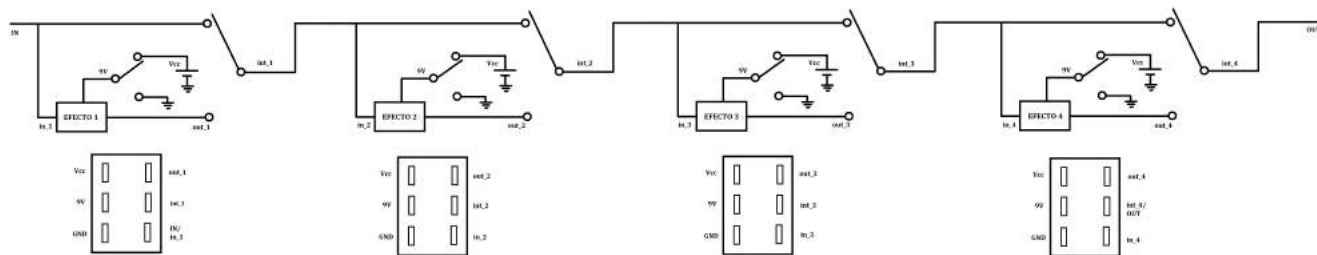


Figura 3.84: Circuito final del módulo de selección

Debido a que al final hay 6 pines por cada uno de los selectores, y un total de 4 selectores, con lo que tendremos 24 pines que habrá que conectar correctamente a la placa de selección.

Para facilitar esta tarea, y evitar una mala conexión y un fallo en el sistema, se estableció un código de colores para las diferentes entradas y salidas del circuito, como el mostrado en la figura 3.85.

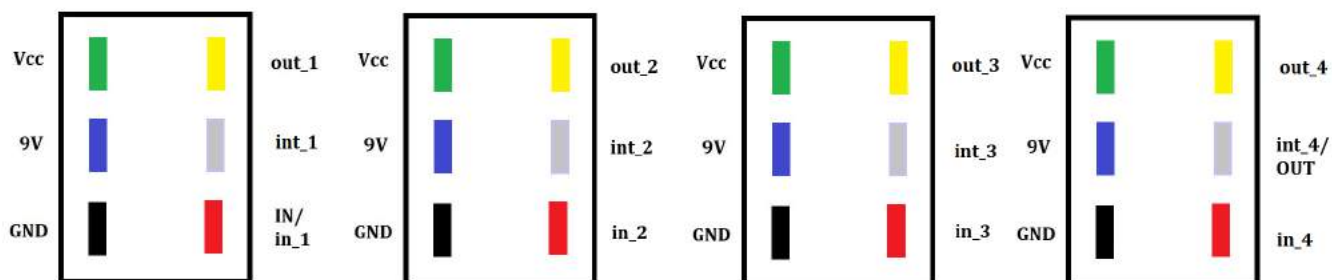


Figura 3.85: Patrón de colores PCB del módulo de selección

En la placa de selección también habrá pines de colores, de manera que resulte intuitivo dónde conectar los diferentes pines de los selectores tanto en el caso de conectar los 4, cómo si se quisiese no usar todos.

### 3.5.2 Diseño de la placa de circuito impreso (PCB)

Se ha empleado el software Fritzing [18] para hacer el esquema de conexiones del circuito (figura 3.86).

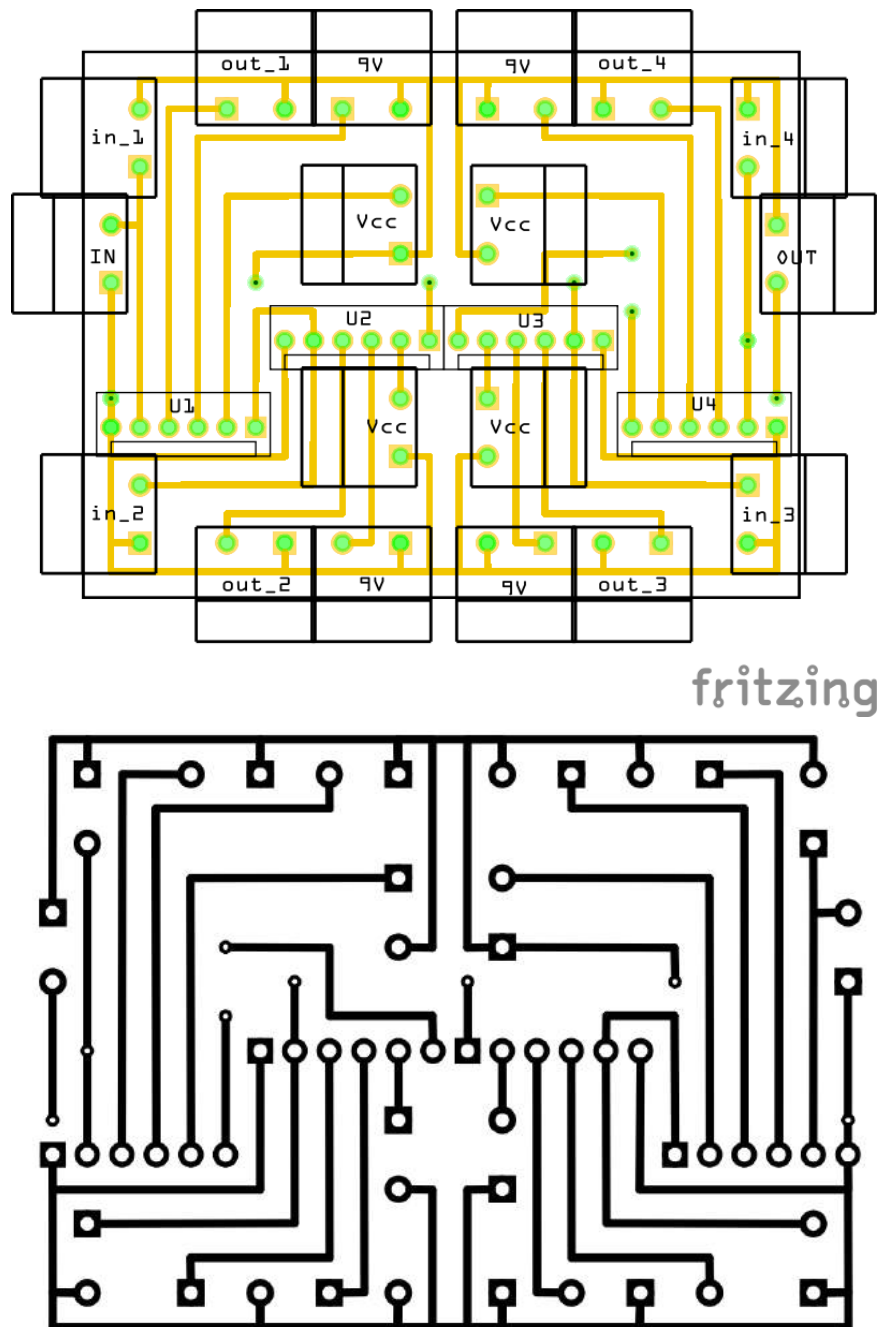


Figura 3.86: PCB placa del módulo de selección



### 3.5.3 Fabricación

Se ha fabricado el sistema de alimentación en una placa perforada (figura 3.87)

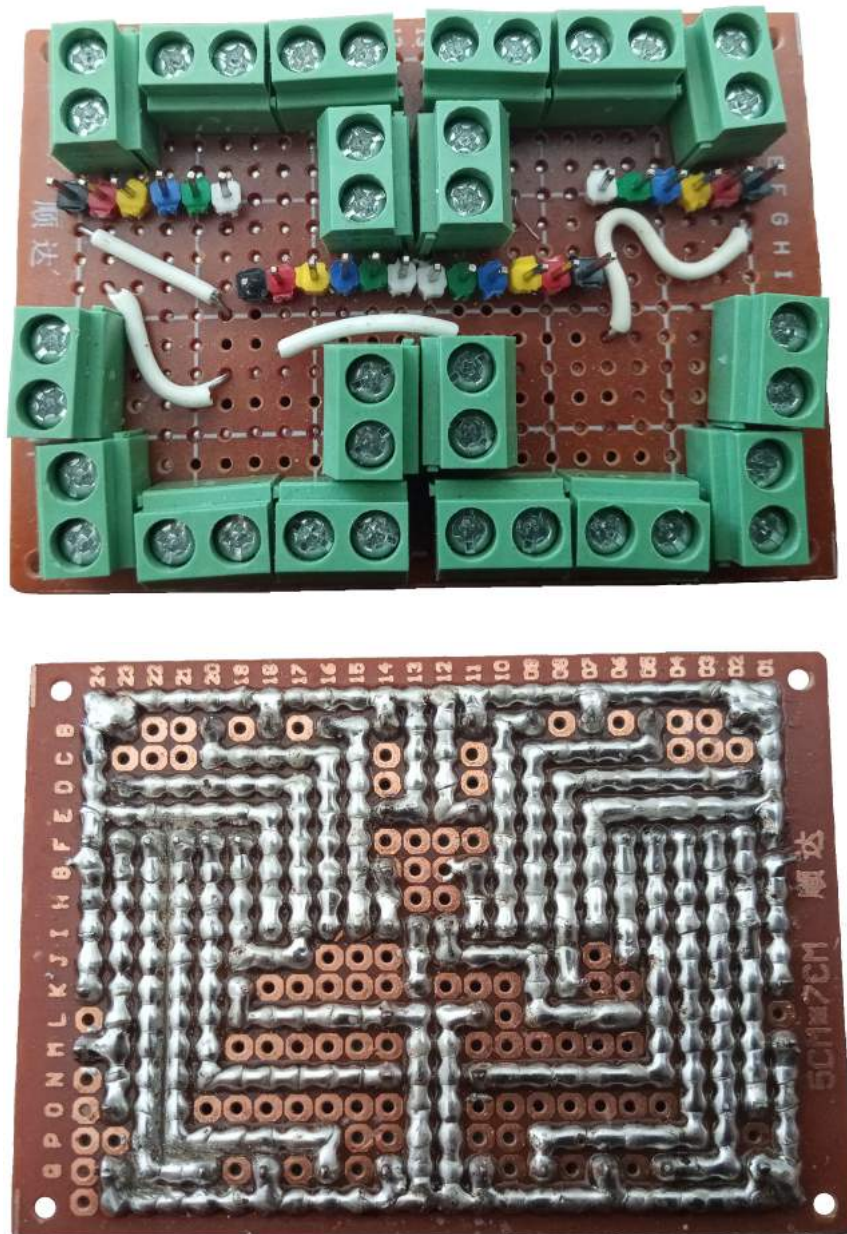


Figura 3.87: PCB placa del módulo de selección fabricada

## 3.6 Diseño de la carcasa

En este proyecto, el diseño de una buena carcasa es un aspecto fundamental, puesto que permitirá cumplir el objetivo de que los efectos diseñados puedan estar incorporados en el instrumento musical.

Antes de empezar a diseñarla, se tuvieron que definir las características y los puntos fundamentales en los que se debería basar el diseño:

- **Debe poder contener los siguientes elementos:**

- 4 placas, una para cada efecto.
- Placa de selección.
- Placa de alimentación.
- 4 switches.
- Jack de entrada y salida.
- Botón de alimentación.
- Batería.

- **Debe ser lo más modular posible:**

Tiene que haber buen acceso a las diferentes subpartes y deben ser fácilmente reemplazables.

- **Debe conservar cierta estética:**

El diseño final debería tener una forma parecida a una guitarra convencional. El modelo que se tomará de base será el modelo Les Paul.

- **Debe poderse encajar y desencajar de la guitarra fácilmente:**

Se deberá acoplar fácilmente a la guitarra, sin modificar ningún elemento de la misma.

### Partes de la carcasa:

- **Marco:** Contorno que se ajuste a la forma de la guitarra y en la cual se irán acoplando el resto de elementos.
- **Base efectos + alimentación:** Plataforma en la que se puedan montar 5 placas (4 efectos + placa alimentación).
- **Selección:** Plataforma en la que se pueda montar la placa de selección y los switches.
- **Botón:** Acople para el botón de la alimentación.
- **Contorno exterior:** Acople para el Jack de salida y el portabaterías.
- **Controles:** Acople para todos los potenciómetros del sistema.



### 3.6.1 Marco

Esta pieza servirá para poder acoplar el resto de componentes, y para hacer el acople de la carcasa con la guitarra (figura 3.88)

La dificultad que presentaba esta pieza era que se debía ajustar lo más posible a la geometría de la guitarra eléctrica. Inicialmente se tomaron ciertos puntos de referencia del contorno de la guitarra, y se diseñó un contorno con la altura de la guitarra.

Más tarde, se añadieron unas conexiones entre las partes del contorno para que tuviera más rigidez a la pieza, como se muestra en la figura 3.88:

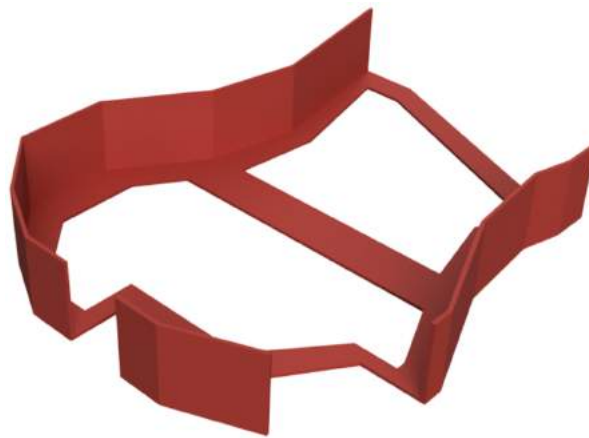


Figura 3.88: Marco

Inicialmente esta pieza se diseñó con un espesor tan fino y con unas uniones tan cortas debido al gran gasto de tiempo de impresión y plástico que suponía, pues esta pieza se trata de un prototipo.

Los dos huecos en la parte inferior se diseñaron para el acople de la correa y el jack de entrada de la guitarra original.

Debido al gran tamaño de esta pieza, y por facilitar su impresión, se dividió en dos piezas (figura 3.89)

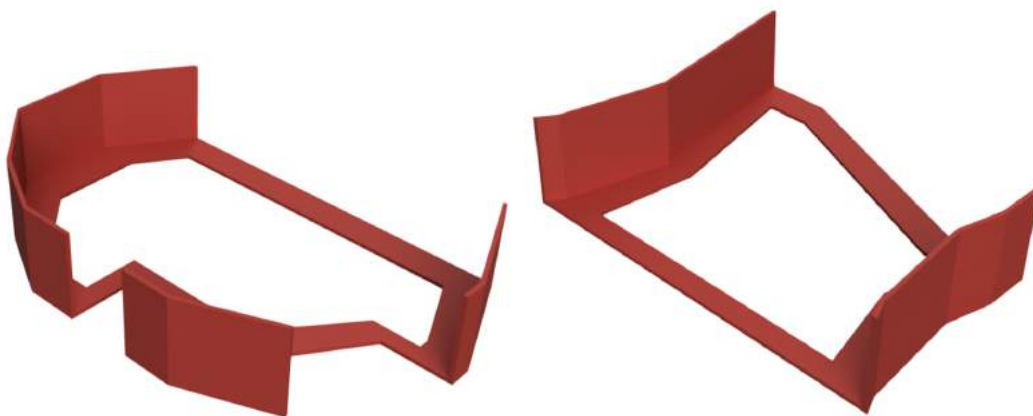


Figura 3.89: Marco dividido

### 3.6.2 Base

Esta parte fue una de las más determinantes, puesto que debido a su gran tamaño en su conjunto, no resulta fácil establecer un sitio donde acoplarla si se quiere mantener una forma estándar de guitarra eléctrica.

Al final se tomó la decisión de colocar los efectos en la parte inferior del cuerpo, que es donde más superficie útil se tendría, y resultaba la única localización que permitía que las placas de los 4 efectos estuvieran juntas.

En un principio, las placas iban a ser configuradas en forma cuadrada de matriz 2x2, sin embargo se encontró con el problema de donde localizar la placa de alimentación:

- Por espacio/estética, se decidió que el jack de salida y la batería estuvieran en la parte inferior derecha e izquierda respectivamente.
- Es conveniente que la parte de selección se encuentre en la parte lateral izquierda, por comodidad para la manipulación de los switches.
- Los cables para hacer las conexiones no deberían ser demasiado largos y, a poder ser, no entrecruzarse con otros componentes.

Por estas razones, se decidió añadir la placa de alimentación a la base, y diseñarla en forma de trapecio, situándola entre la placa de selección, la batería y los efectos.

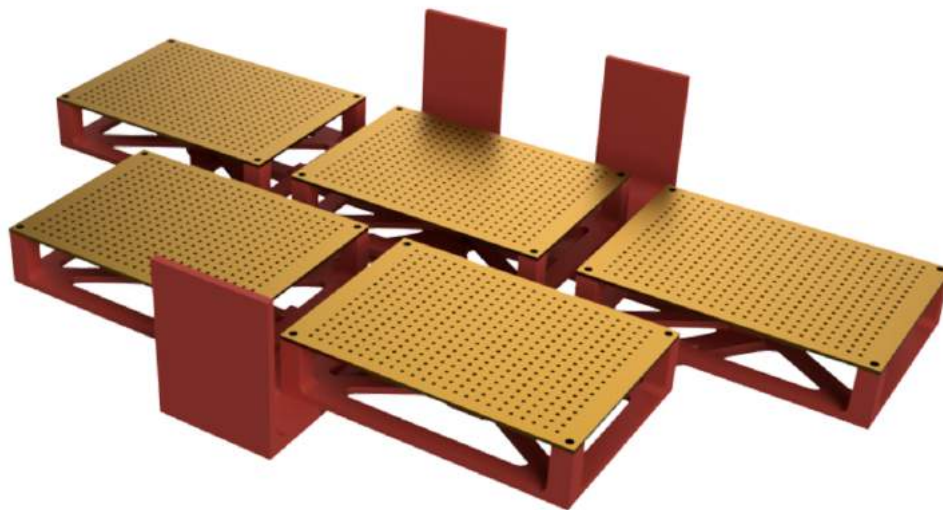


Figura 3.90: Base

La base se puede acoplar a la parte inferior del marco, y se compone de 2 tipos de piezas (figura 3.91)

- La base, donde irán acoplados los soportes de las placas y que determina la colocación de las mismas.
- Los soportes, que sujetarán las placas, tanto si van acopladas a la base, como si se quiere hacer alguna prueba de manera independiente.

La división en estas dos piezas se hizo para facilitar el cambio de placas, o para poder configurar la altura de las placas o cualquier otra dimensión sin necesidad de reimprimir toda la base.

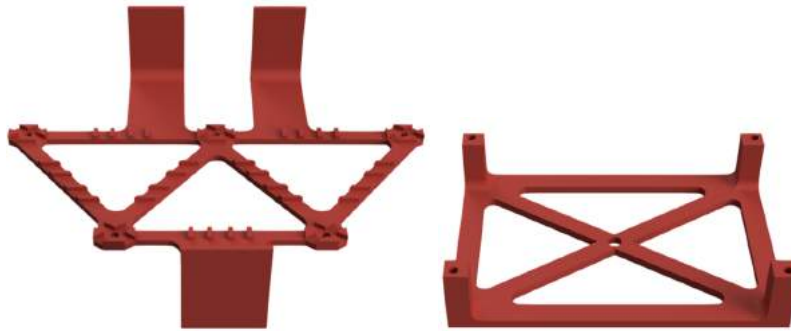


Figura 3.91: Base partes

### 3.6.3 Selección

Esta parte servirá para que el usuario de la guitarra pueda seleccionar qué efectos utilizar, por lo tanto deberá estar en un lugar de fácil acceso.

Se decidió que la etapa de selección estuviese en la parte lateral izquierda de la guitarra, de tal manera que sea la parte mas cercana al artista mientras se esté tocando el instrumento. La parte de selección lo comprenderán 2 piezas, una para poner la placa de selección, y otra para colocar los interruptores:

#### 3.6.3.1 Placa de selección

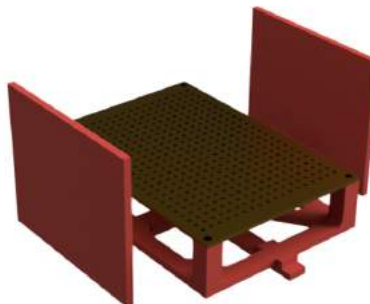


Figura 3.92: Placa selección

La pieza mostrada en la figura 3.92 a su vez se compone de 2 piezas, una la base, muy parecida a la base de los efectos, pero más reducida ya que solo necesita sujetar 1 placa, y otra el mismo soporte de placas que la base del efecto (figura 3.93)



Figura 3.93: Placa selección (Piezas)

### 3.6.3.2 Interruptores

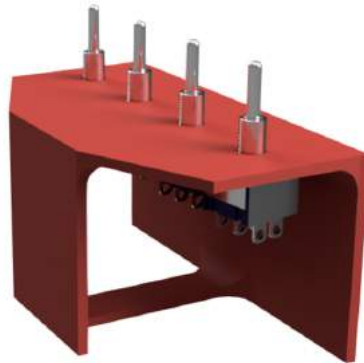


Figura 3.94: Interruptores

Para la pieza de la figura 3.94 era preciso poder anclar 4 interruptores, por lo que se hicieron 4 taladros para poder atornillar la cabeza de los interruptores, y con la separación justa para optimizar espacio (figura 3.95)



Figura 3.95: Interruptores pieza

### 3.6.4 Botón de alimentación

La pieza mostrada en la figura 3.96 deberá sujetar el botón que se utilice para conectar la alimentación al circuito de los efectos. Debido a que el tipo de botón escogido tiene un sistema de clip para su encaje, solo fue necesario hacer un agujero del tamaño del botón con la suficiente tolerancia para que el encaje quedase firme, pero que a su vez fuera posible quitar el botón con no demasiada dificultad. Esta pieza iría colocada en la parte lateral derecha de la guitarra.

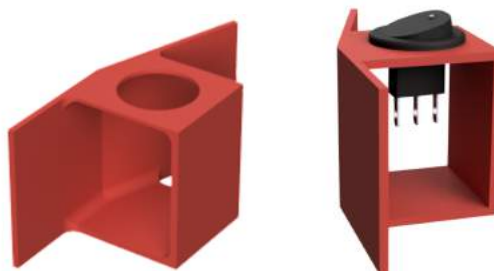


Figura 3.96: Botón alimentación

### 3.6.5 Controles

Esta pieza (figura 3.97) deberá sujetar todos los potenciómetros de los 4 posibles efectos que se pueden incorporar a la guitarra.

Se encontrará situada debajo del puente de la guitarra, justo encima de la pieza que sujeta las 4 placas de los efectos, de tal manera que los potenciómetros de los efectos estuvieran lo más cerca posible de las PCBs.

En resumen, el hecho de que los controles estén en la parte inferior de la guitarra, evitará que el artista pueda rozarlos o modificarlos sin intención de hacerlo mientras se toca el instrumento.

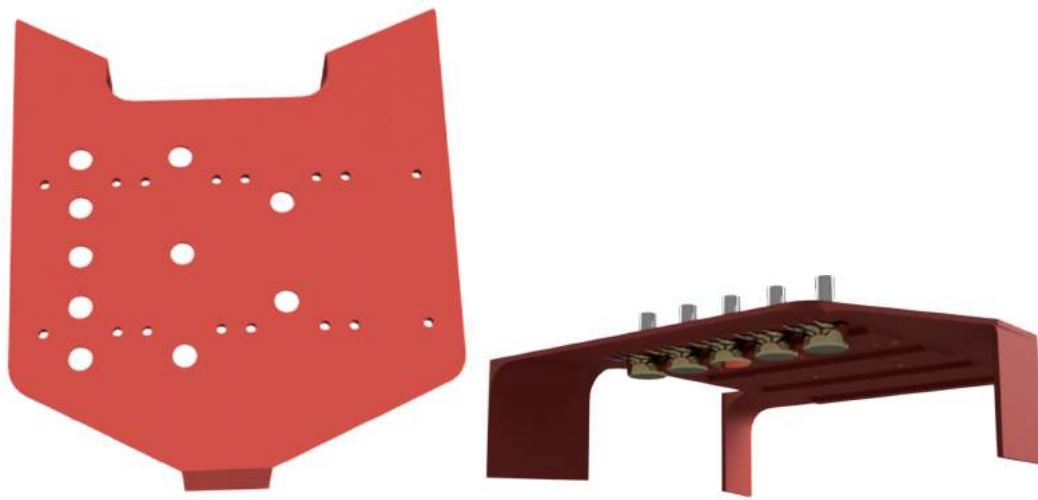


Figura 3.97: Controles

Esta pieza a su vez se compone de 2 tipos de piezas, la base y las placas para los potenciómetros.

#### 3.6.5.1 Base



Figura 3.98: Controles base

Se diseñó esta pieza (figura 3.98) para poderse acoplar tanto al marco como a la base de las placas de los efectos, y se le hicieron unas ranuras para poder atornillar las piezas en las que irán los potenciómetros de los diferentes efectos.

### 3.6.5.2 Piezas de los controles

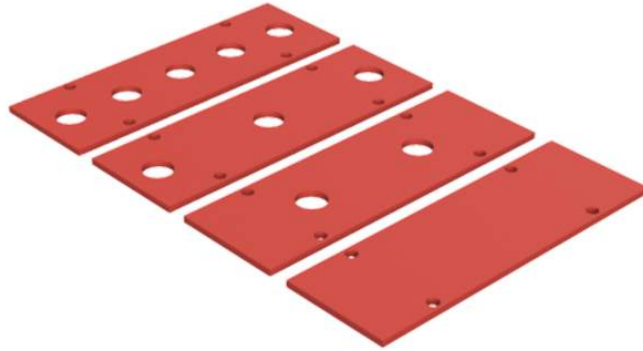


Figura 3.99: Controles placas

Se diseñaron estas piezas (figura 3.99) con la intención de que, en el caso de tener que poner o quitar alguno de los potenciómetros, no fuera preciso desarmar la base.

En resumen, se diseñaron 4 tipos de piezas, con 5, 3, 1 y ningún agujero, de manera que se pudieran adaptar al número de potenciómetros que tuviera el efecto, y la pieza sin agujero para que, en el caso de que no se pusiese efecto, quedase esa parte tapada (por estética).

### 3.6.6 Jack de entrada/Batería

La pieza de la figura 3.100 se colocaría en la parte inferior izquierda de la carcasa, y deberá sujetar tanto el jack de entrada del sistema como el soporte para la batería de 9V.

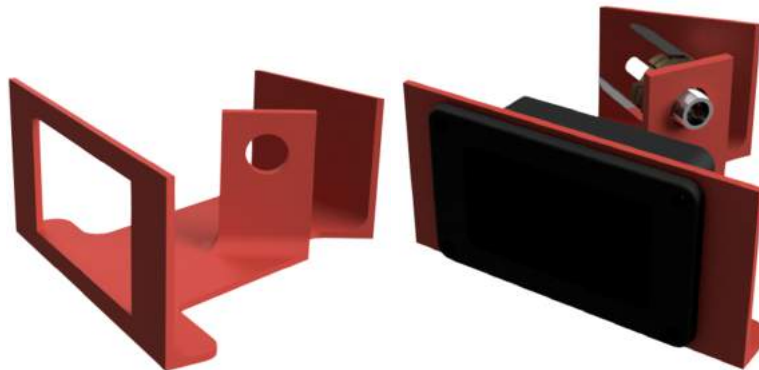


Figura 3.100: Jack de entrada y batería

Se colocó esta pieza en ese sitio debido a que tendría que haber una conexión entre el jack de salida de la guitarra, y la entrada del sistema, y se decidió que esta conexión se hiciese mediante un cable de audio acodado de corta longitud, usados frecuentemente para hacer las conexiones entre pedales.

### 3.6.7 Jack de salida

Esta pieza (figura 3.101) sujetará el jack de salida del sistema. Una posición muy común para el jack de salida en las guitarras eléctricas es en la parte inferior derecha, ya que de esa manera el cable de la guitarra no molestará a la hora de tocar. Con esta pieza se pretende, en la medida de lo posible, conservar esa posición para el jack de salida.



Figura 3.101: Jack de salida

### 3.6.8 Piezas extra

Una vez diseñadas todas las piezas para acoplar los diferentes elementos del sistema electrónico, se diseñaron las siguientes piezas para cubrir algunas necesidades que surgieron (figura 3.102).

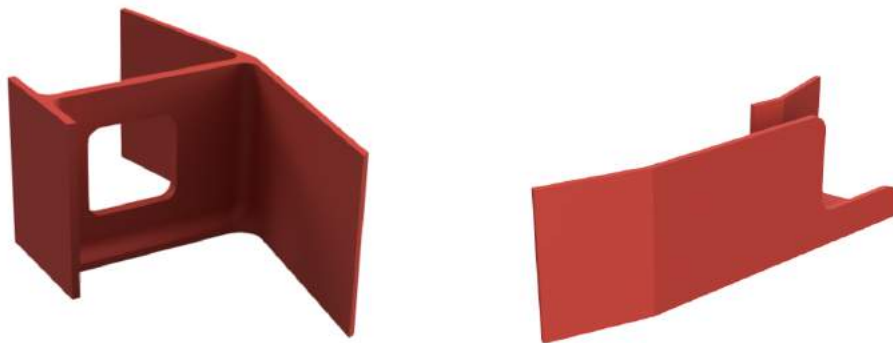


Figura 3.102: Piezas extras

### 3.6.9 Conjunto

Carcasa con los diferentes componentes incorporados (figura 3.103).

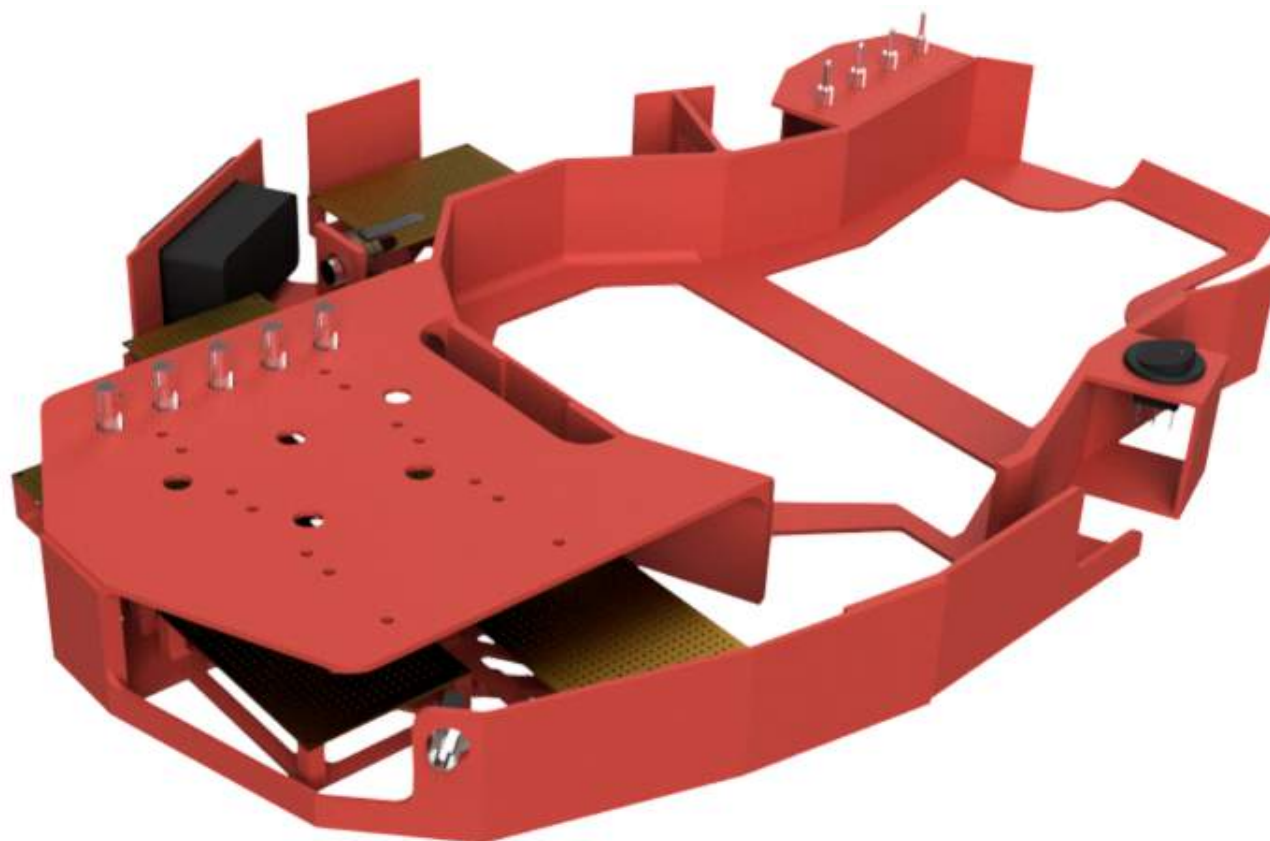


Figura 3.103: Carcasa perspectiva



Carcasa con todas las piezas en vista de planta (figura 3.104).

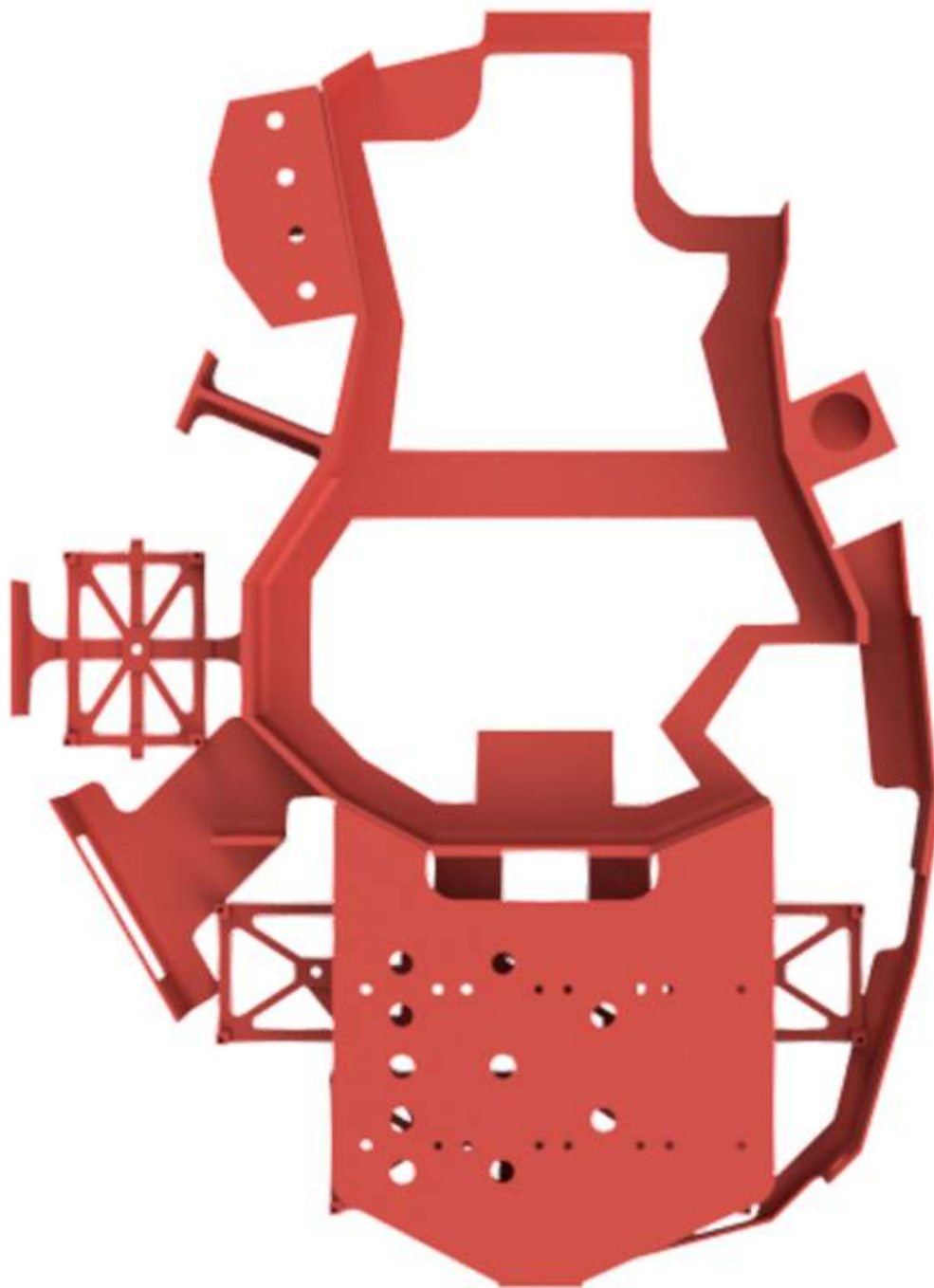


Figura 3.104: Carcasa planta

Piezas de la carcasa (figura 3.105).

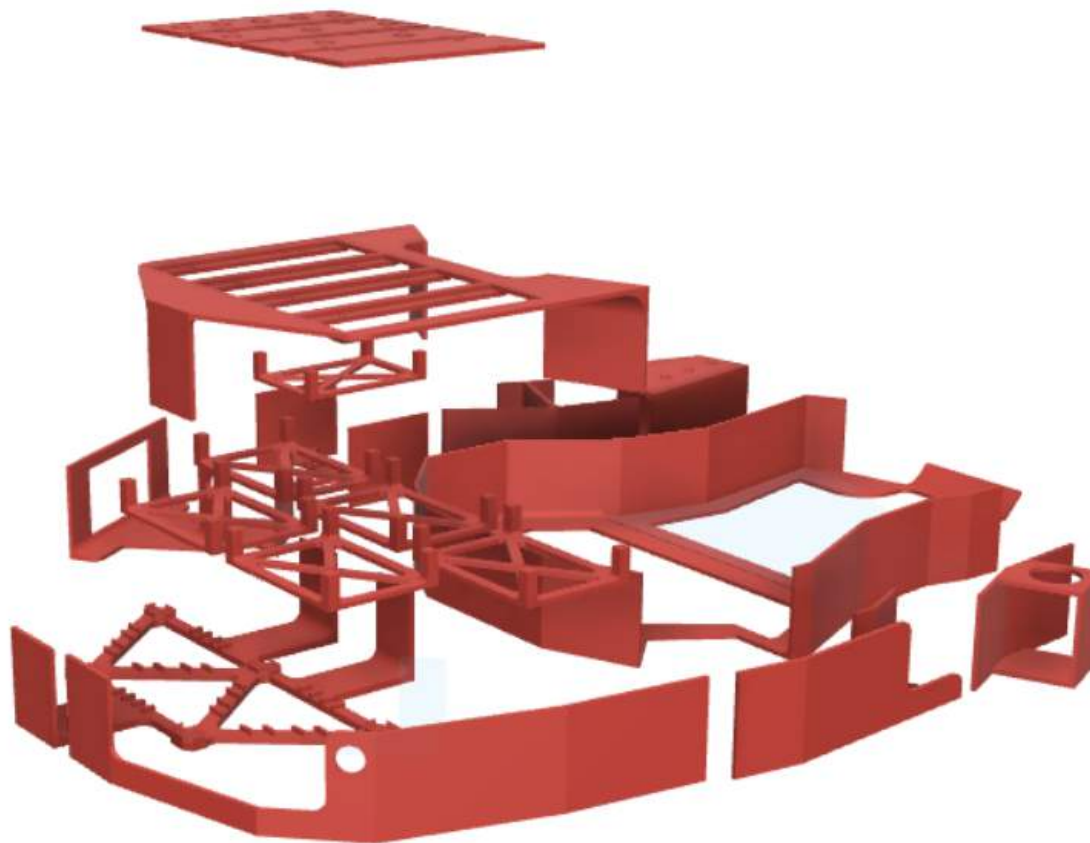


Figura 3.105: Carcasa despiece

# Capítulo 4

## Conclusiones y líneas futuras

### 4.1 Introducción

El capítulo se estructura en dos partes principales, una primera en la que se expondrán las conclusiones principales tras haber finalizado el proyecto, y una segunda que expondrá las posibles mejoras del proyecto que se han observado.

### 4.2 Conclusiones

En esta parte se van a exponer las conclusiones principales del proyecto, una vez finalizado.

En primer lugar, comentar que el sistema en conjunto cumple con su objetivo:

- El sistema de alimentación consigue alimentar con una batería de 9v los diferentes efectos, la activación con el switch es correcta, y el led cumple con su función de lucir cuando el sistema esté alimentado.
- El sistema de selección cumple con lo deseado, ya que activa los efectos independientemente, y cuando no se active un efecto mantiene intacta la señal de entrada. Además, se ha comprobado que los patrones de colores resultan de bastante utilidad para facilitar la conexión de los switches, y que éstos son bastante cómodos en su uso.
- La carcasa cumple con su objetivo, ya que permite acoplar todos los componentes electrónicos del sistema, y se ha conseguido compactar y distribuirlos lo suficiente para que sea viable acoplarla a la guitarra que se eligió para el proyecto.

Ahora bien, también se han identificado ciertos puntos en los que el proyecto es muy mejorable:

- Los diseños de los efectos no son perfectos. En las pruebas se han notado que, aunque los efectos cumplen con sus funcionalidades, presentan más ruidos e interferencias que los fabricados a partir de diseños de pedales reales.
- La forma de la carcasa no sigue ninguna forma convencional. Al final, la forma de la carcasa se ha ido diseñando a medida se iban añadiendo elementos al sistema, con lo que no sigue ninguna forma estándar de guitarra. Ésto no resulta un punto negativo, sin embargo, se podría mejorar.

Para terminar, las conclusiones finales del proyecto serían:

- El objetivo principal del proyecto era fabricar un sistema completo, incluyendo su planteamiento inicial, requerimientos, diseños, fabricación y presupuesto, lo cual ha supuesto un reto atractivo, con un resultado realmente satisfactorio.
- Los efectos de guitarra eléctrica son una aplicación muy interesante, entretenida y completa de la electrónica. Tanto en el diseño como en la fabricación, a parte de aplicarse los conocimientos adquiridos en la carrera, se han adquirido otros nuevos. Se concluye que es muy importante encontrar una aplicación que resulte atractiva para mejorar en el aprendizaje de cualquier disciplina.
- El requerimiento de diseñar una carcasa para incorporar un sistema electrónico a una guitarra eléctrica ha supuesto un reto interesante, teniendo que aplicar conocimientos en diseño e impresión 3D, búsqueda de materiales y métodos para optimizar tanto espacio como presupuesto del proyecto.

## 4.3 Líneas futuras

### 4.3.1 Añadir más efectos

Si bien el sistema está diseñado para incluir 4 efectos, para este proyecto sólo se han podido diseñar e implementar 2. En un futuro se pretende analizar el funcionamiento de otro tipo de efecto, como pueden ser el chorus, el compresor, el wha-wha, entre otros, para poder incluirlos al sistema.

### 4.3.2 PCBs mecanizadas

El hecho de no disponer de la maquinaria necesaria para fabricar PCBs llevó a fabricar los circuitos del proyecto con placas perforadas y soldando a mano las pistas. El resultado tampoco es malo, y ha permitido adquirir experiencia en esta forma de simplificar y comprimir circuitos electrónicos, pero para el futuro se pretende implementar circuitos impresos más profesionales.

### 4.3.3 Sustitución de cables

Un requerimiento en el diseño electrónico del sistema era que fuera fácil de desconectar y conectar los diferentes elementos electrónico. Analizando el resultado final se puede observar que se puede mejorar bastante el conexionado, sustituyendo los cables sueltos por buses o con un sistema que permita conectar y desconectar los elementos a una PCB general para todo el sistema.

### 4.3.4 Mejora de la carcasa

La opción de hacer una carcasa de plástico no es mala, ya que es un material ligero, y con la tecnología de la impresión 3D, permite hacer piezas muy específicas. Sin embargo, hacer toda la carcasa de plástico no resulta tan viable, por su amplio volumen, y el hecho de que sea ligero no favorece al equilibrio del instrumento. Un planteamiento para un futuro podría ser emplear la impresión 3D para todas aquellas piezas de tamaño medio-pequeño en las que vayan acopladas, por ejemplo, los circuitos impresos, y fabricar un cuerpo de madera, que proporcione a parte de al conjunto un centro de masas adecuado.

# Capítulo 5

## Presupuesto

En este capítulo se presentará un desglose con los costes del proyecto, con el objetivo de analizar la rentabilidad económica del resultado final.

Va a haber una separación de los gastos en 3 partes principales, los gastos materiales, los gastos de herramientas y los gastos de mano de obra

### 5.1 Gastos materiales

Debido a que hay materiales que se han adquirido en tiendas físicas, y otros de manera online en packs de varias unidades, se ha considerado un precio promedio en todos los materiales, de manera que se considera que en el caso de los materiales en packs de varias unidades sólo se han adquirido las unidades necesarias para el proyecto.

Se va a desglosar los materiales en las diferentes subpartes fabricadas de este proyecto:

- Guitarra eléctrica
- Efecto de distorsión
- Efecto de retardo
- Etapa de selección
- Etapa de alimentación
- Carcasa

#### 5.1.1 Guitarra eléctrica

La guitarra eléctrica se compró por encargo en la tienda Musicopolix localizada en Alcalá de Henares:

Material	Precio Unitario	Cantidad	Total
Guitarra eléctrica modelo Hofner Shorty	130€	1	130€

Tabla 5.1: Presupuesto guitarra eléctrica

## 5.1.2 Efecto de distorsión

Material	Precio Unitario	Cantidad	Total
Resistencias	0.10€	15	1.5€
Condensadores	0.10€	11	1.1€
Transistores	0.5€	2	1€
Amplificador Operacional TL072	0.65€	1	0.65€
Diodos LED	0.1€	2	0.2€
Placa perforada	0.1€	1	0.1€
Potenciómetros	1.5€	5	7.5€
Cables potenciómetros	0.45	5	2.25€
Jacks audio entrada	2.2€	1	2.2€
Jack audio salida	1.1€	1	1.1€
Jack alimentación	0.8€	1	0.8€
Conectores entrada y salida	0.6€	2	1.2€
Conector alimentación	0.3€	1	0.3€
Clemas PCB	0.12€	8	0.96€
Pines hembra(3 pines)	0.05	2	0.1€
Pines integrados(8 pines)	0.2	1	0.2€
<b>Total</b>	-	-	<b>21.16€</b>

Tabla 5.2: Presupuesto etapa de distorsión

## 5.1.3 Placa alimentación

Material	Precio Unitario	Cantidad	Total
Condensadores	0.10€	4	0.40€
Placa perforada	0.1€	1	0.1€
Clemas PCB (2 vías)	0.3€	5	1.5€
Pines macho	0.03€	3	0.09€
Switch	1€	1	1€
Cable alargador switch	0.5€	1	0.5€
Portabaterías	5€	1	5€
Batería	1€	1	1€
Conector alimentación	0.3€	5	1.5€
<b>Total</b>	-	-	<b>11.09€</b>

Tabla 5.3: Presupuesto placa de alimentación

## 5.1.4 Efecto de retardo

Material	Precio Unitario	Cantidad	Total
Resistencias	0.10€	13	1.3€
Condensadores	0.10€	11	1.1€
Amplificador Operacional TL072	0.65€	1	0.65€
Placa perforada	0.1€	1	0.1€
Potenciómetros	1.5€	3	4.5€
Cables potenciómetros	0.45	3	1.35€
Jacks audio entrada	2.2€	1	2.2€
Jack audio salida	1.1€	1	1.1€
Jack alimentación	0.8€	1	0.8€
Conectores entrada y salida	0.6€	2	1.2€
Conector alimentación	0.3€	1	0.3€
Clemas PCB	0.12€	6	0.72€
Pines hembra(3 pines)	0.05	1	0.05€
Reguladro 78L05	0.03€	1	0.03€
Pines integrados(8 pines)	0.2	3	0.6€
Integrado PT2399	0.5€	1	0.5€
<b>Total</b>	-	-	<b>16.5€</b>

Tabla 5.4: Presupuesto etapa de retardo

## 5.1.5 Placa selección

Material	Precio Unitario	Cantidad	Total
Placa perforada	0.1€	1	0.1€
Clemas PCB (2 vías)	0.3€	18	5.4€
Pines macho	0.03€	24	0.72€
Selectores	0.6€	4	2.4€
Conectores	0.3€	18	5.4€
<b>Total</b>	-	-	<b>14.02€</b>

Tabla 5.5: Presupuesto placa de selección

## 5.1.6 Carcasa

El presupuesto de la carcasa es un poco más complejo de estimar, ya que entran factores como el tiempo de impresión, el coste del material, la necesidad de imprimir prototipos, etc.

Para establecer el presupuesto de la carcasa se va a considerar solamente el material empleado, y de la versión final de la carcasa.

Gramos	Precio/Kg	Total
564	20€	<b>11.28€</b>

Tabla 5.6: Presupuesto carcasa

## 5.2 Gastos de herramientas

En este apartado se incluirán todas aquellas herramientas usadas a lo largo del proyecto.

Herramienta	Precio Unitario	Cantidad	Total
Impresora 3D	140€	1	140€
Soldador	10€	1	10€
Carrete de estaño	10€	1	10€
Abrazadera de mesa para soldadura	13€	1	13€
Multímetro	13€	1	13€
Lima de precisión	1€	5	5€
Destornillador de precisión	5€	1	5€
<b>Total</b>	-	-	<b>196€</b>

Tabla 5.7: Gastos de herramientas

## 5.3 Gastos de mano de obra

Para estimar los gastos de la mano de obra, va a haber dos factores fundamentales, las horas totales de mano de obra, y el precio hora de mano de obra.

### 5.3.1 Desglose de horas

Parte	Horas
Análisis previo	80
Diseño electrónico de los efectos	80
Implementación de los diseños de los efectos	80
Diseño, implementación y evaluación y evaluación del sistema de selección de efectos	80
Diseño, implementación y evaluación y evaluación del acople para la guitarra	80
Integración y comprobación del correcto funcionamiento del sistema	40
Conclusión sobre el proyecto y planteamiento de posibles mejoras	40
Documentación del proyecto	80
<b>Total</b>	<b>560</b>

Tabla 5.8: Desglose de horas mano de obra

### 5.3.2 Gastos totales mano de obra

Se estimará un precio hora de mano de obra de 60€/hora

Horas totales	Precio hora	Precio total
560	60€/hora	<b>33600€</b>

Tabla 5.9: Gastos totales de mano de obra



## 5.4 Gastos totales del proyecto

Parte	Total
Guitarra	130.00€
Efecto de distorsión	21.16€
Efecto de retardo	16.50€
Placa de alimentación	11.09€
Placa de selección	14.02€
Carcasa	11.28€
Herramientas	196.00€
Mano de obra	33600.00€
<b>Total</b>	<b>34000.05€</b>

Tabla 5.10: Presupuesto total

El importe total del presupuesto asciende a la cantidad de : TREINTA CUATRO MIL EUROS CON CINCO CÉNTIMOS



# Bibliografía

- [1] "tienda made-in-china (cuerpo guitarra stratocaster)," <https://m.made-in-china.com/product/Unfinished-2-Piece-Alder-Strat-Guitar-Body-for-SSS-Guitars-778389915.html>.
- [2] "tienda ubuy (cuerpo guitarra les paul)," <https://www.ubuy.mu/en/product/1OPWOK3M-guitar-unfinished-body-okoume-wood-body-maple-veener-top>.
- [3] "tienda riverside music (guitarra epiphone les paul studio)," [https://riversidemusic.com/shop/electric\\_guitars/epiphone-les-paul-studio-worn-cherry/](https://riversidemusic.com/shop/electric_guitars/epiphone-les-paul-studio-worn-cherry/).
- [4] "pastillas de guitarra eléctrica: Tipos y funcionamiento," <https://miguitarraelectrica.com/pastillas-guitarra-electrica/>.
- [5] "the top 10 best guitar pedals in the market," <https://www.wirerealm.com/guides/top-10-best-guitar-pedals>.
- [6] "te enseñaré cómo se conectan los switch 3pdt y dpdt + identifi," <https://www.guitarristas.info/foros/enseno-como-conectan-switch-3pdt-dpdt-identifi/226119/pagina2>.
- [7] "la diferencia entre fuzz, overdrive y distorsión," <https://reverb.com/es/news/fuzz-distorsion-et-overdrive-quelle-difference>.
- [8] "efecto de retardo," <http://www.disca.upv.es/adomenec/IASPA/tema4/ES-Retardos.html>.
- [9] "tienda online musicopolix," <https://musicopolix.com/cat/guitarras/electricas/32408-guitarra-hfner-shorty-roja.html>.
- [10] "maestro | fz-1 fuzz tone," <https://sugareelicks.com/pedal/maestro-fz-1-fuzz-tone/>.
- [11] "datasheet del pt2399," <https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/391581/PTC/PT2399.html>.
- [12] P. D. R. Montalvo, "diseño de filtros 2," <https://sites.google.com/view/paul-rosero-montalvo/publicaciones?authuser=0>.
- [13] "delta-sigma adc basics: Understanding the delta-sigma modulator," [https://e2e.ti.com/blogs\\_/archives/b/precisionhub/posts/delta-sigma-adc-basics-understanding-the-delta-sigma-modulator](https://e2e.ti.com/blogs_/archives/b/precisionhub/posts/delta-sigma-adc-basics-understanding-the-delta-sigma-modulator).
- [14] "diagrama del circuito convertidor digital-analógico de 8 bits," [https://www.researchgate.net/figure/FIGURA-6-Diagrama-del-circuito-convertidor-digital-analogico-de-8-bits\\_fig6\\_235754545](https://www.researchgate.net/figure/FIGURA-6-Diagrama-del-circuito-convertidor-digital-analogico-de-8-bits_fig6_235754545).
- [15] "reguladores / referencias / conversores de voltaje," <https://www.electronicoscaldas.com/es/reguladores-referencias-conversores-de-voltaje/173-regulador-78l05.html>.
- [16] "página oficial tonepad," <http://tonepad.com/projects.asp?projectType=fx>.

- 
- [17] “"página de referencia para análisis y diseño electrónico de pedales",” <https://www.electrosmash.com>.
- [18] “"página del software fritzing",” <https://fritzing.org/>.
- [19] “"página oficial del software de simulación tina",” <https://www.ubuy.mu/en/product/1OPWOK3M-guitar-unfinished-body-okoume-wood-body-maple-veener-top>.
- [20] “"página oficial del software fusion360",” <https://www.autodesk.com/products/fusion-360/overview>.
- [21] “"página oficial de la aplicación ultimaker cura",” <https://ultimaker.com/es/software/ultimaker-cura>.
- [22] L. Lamport, *LaTeX: A Document Preparation System, 2nd edition*. Addison Wesley Professional, 1994.

## Apéndice A

# Herramientas y recursos

Las herramientas necesarias para la elaboración del proyecto han sido:

- PC compatible
- Entorno de simulación TINA [[19](#)]
- Software de diseño 3D Fusion360[[20](#)]
- Software de generación G-code CURA [[21](#)]
- Software de diseño PCB Fritzing [[18](#)]
- Procesador de textos L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X[[22](#)]





Universidad de Alcalá  
Escuela Politécnica Superior



ESCUELA POLITECNICA  
SUPERIOR