

---

# Análisis e implementación de un sintetizador de audio mediante circuitos analógicos y algoritmos digitales controlados por comunicación MIDI

---

Héctor Manuel de León Salguero



UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA  
Facultad de Ingeniería



**Análisis e implementación de un sintetizador de audio mediante circuitos analógicos y algoritmos digitales controlados por comunicación MIDI**

Trabajo de graduación en modalidad de tesis presentado por  
Héctor Manuel de León Salguero  
para optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería en  
Tecnología de Audio

Guatemala  
2024



UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA  
Facultad de Ingeniería



**Análisis e implementación de un sintetizador de audio mediante circuitos analógicos y algoritmos digitales controlados por comunicación MIDI**

Trabajo de graduación en modalidad de tesis presentado por  
Héctor Manuel de León Salguero  
para optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería en  
Tecnología de Audio

Guatemala  
2024

Vo.Bo. Asesor



---

Ing. Pablo Oliva

Vo.Bo. Terna Examinadora



---

Ing. Pablo Oliva  
( ASESOR )



---

Ing. Dulce Chacón



---

Ing. Christopher Berganza

Guatemala, 25 de enero de 2024

---

## Agradecimientos

---

Agradezco en primer lugar a Dios por haberme dado una familia increíble y por permitirme vivir una experiencia inolvidable los últimos cinco años estudiando en esta universidad.

Agradezco a mis padres Adolfo y Nelly, quienes han dado su vida por ayudar a sus hijos a alcanzar el éxito. Agradezco y aprecio el esfuerzo que realizaron para que yo pudiera tener una buena educación y agradezco su apoyo incondicional en cada etapa de mi vida. También agradezco su deseo por transmitirme la fe. Agradezco a mis hermanos Carlos, Adolfo y José, por haber sido un modelo a seguir durante tantos años, por creer en mí y por ayudarme a ser mejor. Durante mi carrera, mi familia fue una enorme motivación para seguir adelante. Agradezco a mis tíos, primos, a mi abuelita Chiqui, pero sobre todo a mi abuelita Paula y mi tía Vila. Agradezco a ellas por formarme durante mi niñez, por alegrarse con cada logro que tuve en mi vida y por amarme incondicionalmente. Estoy seguro de que ambas están contentas por este gran logro y sé que aún cuidan de mí.

Agradezco a todos los profesores que tuve durante mi etapa universitaria por su profesionalismo y su deseo de enseñar. Aprendí mucho de ellos, no solo sobre las materias que impartían, también aprendí que la docencia es una vocación que se puede ejercer en cualquier ámbito de la vida y en cualquier momento. Agradezco su tiempo y su comprensión. A Pablo Oliva le agradezco personalmente su disposición para ayudarme y asesorarme en esta tesis, por tomarse el tiempo de explicarme y ayudarme a resolver los problemas que tuve durante la realización de la misma.

Agradezco a mis compañeros de carrera, pues ellos fueron mi compañía y mi motivación cada año. Aprendí mucho de ellos y sé que lo seguiré haciendo en el ámbito profesional. Agradezco a todas las personas que creyeron en mí, cuyos nombres llenarían decenas de páginas de este documento, pero que aprecio y siempre recordaré con mucho cariño durante mi paso por la universidad.

<b>Agradecimientos</b>	<b>III</b>
<b>Lista de figuras</b>	<b>VIII</b>
<b>Lista de cuadros</b>	<b>IX</b>
<b>Resumen</b>	<b>x</b>
<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
<b>2. Objetivos</b>	<b>2</b>
2.1. Objetivo general .....	2
2.2. Objetivos específicos .....	2
<b>3. Justificación</b>	<b>3</b>
<b>4. Marco teórico</b>	<b>4</b>
4.1. Síntesis de audio y sintetizadores.....	4
4.1.1. Sintetizadores digitales y analógicos.....	4
4.1.2. Clases de sintetizadores analógicos según su configuración .....	5
4.1.3. Control por voltaje(CV).....	5
4.2. Oscilador Controlado por Voltaje (VCO).....	6
4.2.1. ¿Por qué un convertidor exponencial?.....	7
4.3. Envolvente (EG).....	7
4.4. Filtro Controlado por Voltaje (VCF).....	8
4.4.1. Filtro pasa bajas.....	8
4.5. Sintetizador Modular y diseño Eurorack.....	8
4.5.1. Dimensiones del formato Eurorack .....	8
4.6. Fuente de Poder.....	10
4.6.1. Fuentes lineales y conmutadas .....	10
4.7. Buffers y acoples AC .....	12
4.8. Comunicación MIDI.....	12
4.8.1. Status bytes.....	12
4.8.2. Data bytes .....	13
4.8.3. Tipos de mensajes.....	13
<b>5. Alcance</b>	<b>16</b>

<b>6. Metodología</b>	<b>17</b>
<b>7. Simulación y análisis</b>	<b>18</b>
7.1. VCO.....	18
7.1.1. Oscilador principal.....	19
7.1.2. Cambio de frecuencia.....	20
7.1.3. Frecuencia modulada y una afinación más precisa.....	21
7.1.4. Implementación de una señal PWM.....	22
7.2. VCF.....	22
7.2.1. Filtros activos y pasivos.....	24
7.2.2. Resonancia.....	24
7.2.3. frecuencia de corte modificada mediante CV.....	26
7.2.4. Escalera de diodos.....	27
7.3. Envolvente.....	31
7.4. Etapa de salida.....	35
7.5. Fuente de poder.....	38
<b>8. Discusión de resultados</b>	<b>40</b>
8.1. VCO.....	40
8.2. VCF.....	40
8.3. Envolvente.....	42
8.4. Etapa de salida.....	44
8.5. Fuente de poder.....	45
<b>9. Conclusiones</b>	<b>47</b>
<b>10. Recomendaciones</b>	<b>48</b>
<b>11. Bibliografía</b>	<b>50</b>
<b>12. Anexos</b>	<b>51</b>
<b>A. Anexos</b>	<b>51</b>
A.1. Construcción del filtro.....	51
A.2. Construcción del envolvente.....	51



---

## Lista de figuras

---

4.1. El 12 de octubre de 1964, Robert Moog revela el primer sintetizador controlado por voltaje. ....	5
4.2. El diagrama de bloques de un módulo ADSR (izquierda) muestra cómo se conecta aun teclado a dicho módulo. Las gráficas de voltaje vs tiempo(derecha) muestran el efecto que un gate, emitido por el teclado, tiene en el módulo ADSR [7]. ....	6
4.3. Tipos de onda [12]. ....	7
4.4. Contenido armónico de una onda triangular y una cuadrada, ambas a 440Hz. ....	7
4.5. Filtro pasa bajas. ....	8
4.6. Sistema estándar para rack de 6U, doble fila [7] ....	9
4.7. Posición de los tornillos en un panel para Eurorack[7]. ....	9
4.8. Diagrama de etapas de una fuente de alimentación lineal ([1]). ....	11
4.9. Diagrama de etapas de una fuente de alimentación conmutada ([1]). ....	11
4.10. Tipos de bytes MIDI. ....	13
4.11. Tipos de mensajes MIDI. ....	14
4.12. Esquemático del circuito para la comunicación MIDI mediante un cable DIN de 5 pines. ....	15
7.1. VCO diseñado por Moritz Klein en colaboración con Erika Sinths. ....	18
7.2. Oscilador principal del VCO. ....	19
7.3. Funcionamiento del comparador Schmitt Trigger ....	19
7.4. Onda con forma de diente de sierra, generada a partir del circuito de la Figura 7.2. ....	20
7.5. Oscilador principal con acople AC. ....	20
7.6. Onda original(verde) vs onda sin offset(azul). ....	21
7.7. Gráfica de voltaje vs tiempo de las entradas de un comparador y su salida. La entrada positiva (rojo), la negativa(azul) y la salida(verde). ....	22
7.8. Secciones del circuito del VCO. 1.Oscilador principal, 2. Afinación y adecuación de la señal de entrada para controlar la frecuencia, 3. Señal PWM y etapa de salida. ....	23
7.9. Módulo de filtro pasa bajas con resonancia para un sintetizador. ....	24
7.10. Filtro pasivo de 3er orden. ....	24
7.11. Análisis transiente del filtro de la Figura 7.10. ....	25
7.12. Filtro activo de 3er orden. ....	25
7.13. Análisis transiente del filtro de la Figura 7.12. ....	26
7.14. Filtro activo pasa bajas de segundo orden, con resonancia ....	26
7.15. Gráfico de voltaje vs tiempo de una señal con resonancia (Figura 7.14). ....	27
7.16. Filtro activo pasa bajas de segundo orden, con resonancia amplificada. ....	27
7.17. Gráfico de voltaje vs tiempo, oscilación causada por resonancia (Figura 7.16). ....	28
7.18. Filtro pasa bajas con diodos como resistencias. ....	28

7.19. Gráfico de amplitud vs tiempo del filtro pasa bajas con diodos como resistencias (7.18).	29
7.20. Filtro escalera de diodos con número par de etapas.	29
7.21. Gráfico de amplitud vs tiempo del filtro pasa bajas con diodos como resistencias (7.20).	30
7.22. Sección del circuito encargada de controlar la frecuencia de corte del filtro.	30
7.23. Gráfica de voltaje vs tiempo del circuito de la Figura 7.22. La línea verde indica el valor del voltaje CV a la entrada del sumador y el restador. Este valor es de aproximadamente -1.3V La señal de entrada está centrada en 0(Celeste). La señal de color rojo muestra la salida del sumador, invertida y desfasada 1.3V. La señal azul es la del restador, invertida y desfasada -1.3V.	31
7.24. Amplificador de resonancia.	31
7.25. Circuito del módulo envolvente.	32
7.26. Envolvente Attack Decay Sustain Release, primera etapa.	32
7.27. Envolvente Attack Decay Sustain Release, segunda etapa.	33
7.28. Gráfico de voltaje vs tiempo de la salida de la primera etapa (Vout1) y la salida del circuito (Out).	33
7.29. Salida invertida.	34
7.30. Gráfico de voltaje vs tiempo de la salida del circuito (Out) y su salida invertida (InvOut).	34
7.31. Salida invertida (InvOut) con offset de 4.5V.	35
7.32. Etapa de retroalimentación para activar el envolvente continuamente.	35
7.33. Gráfico de voltaje vs tiempo del "loop".	36
7.34. Circuito del módulo de salida.	36
7.35. Entrada y paneo.	37
7.36. Etapa de salida.	37
7.37. Fuente de voltaje lineal [13].	38
7.38. Gráfico de voltaje vs tiempo de la fuente lineal, con una entrada de voltaje AC de 12Vrms.	39
7.39. Circuito para conexión de la fuente de poder a cada módulo del sintetizador.	39
8.1. Gráfico de voltaje vs tiempo medido con osciloscopio. Onda diente de sierra (Amarillo) y señal PWM(Azul).	41
8.2. Señal PWM con ciclo de trabajo alto.	41
8.3. Señal PWM con ciclo de trabajo bajo.	42
8.4. Gráfico de voltaje vs tiempo de un filtro pasa bajas. señal cuadrada a la entrada y señal suavizada a la salida.	42
8.5. Gráfico de voltaje vs tiempo de un filtro pasa bajas. señal cuadrada a la entrada y señal suavizada con resonancia a la salida.	43
8.6. Voltaje de entrada(amarillo) y salida(azul) del módulo envolvente con configuración de Loop.	43
8.7. Configuración single. En esta configuración es posible agregar decay y sustain.	44
8.8. Señal sin attack.	44
8.9. Señal sin release.	45
8.10. Señal totalmente paneada.	45
8.11. Señales de salida con poco paneo.	46
10.1. Circuito de un filtro Notch activo, calculado para atenuar 60Hz.	48
10.2. Gráfico de voltaje vs tiempo de una señal senoidal de entrada(Vin) de 1kHz, con ruido de 60H la señal filtrada(Vout) sin ruido.	49
10.3. Análisis AC de la magnitud de la entrada y la salida del filtro. Se puede apreciar que el filtro notch atenúa los 60Hz aproximadamente 19 decibelios y tiene frecuencias de corte en 22Hz y 141Hz aproximadamente.	49
A.1. Vista inferior de la placa perforada.	51
A.2. Vista superior de la placa perforada.	52

A.3. Diseño del panel frontal con entradas, salidas y potenciómetros debidamente indicados. ....	52
A.4. Pruebas de laboratorio.....	53
A.5. Pruebas de laboratorio.....	53
A.6. Vista inferior de la placa perforada. ....	53
A.7. Vista superior de la placa perforada.....	54
A.8. Diseño del panel frontal con entradas, salidas y potenciómetros debidamente indicados. ....	54
A.9. Pruebas en el laboratorio.....	54
A.10. Pruebas en el laboratorio.....	55
A.11. Pruebas en el laboratorio.....	55

---

## Lista de cuadros

---

4.1. Ancho de panel, en HP y en mm. ....	10
4.2. Tabla de comparación entre una fuente conmutada y una fuente lineal. ....	12

El proyecto consiste en un sintetizador analógico, es decir, un instrumento musical electrónico que produce sonidos a partir de variaciones en señales producidas por oscilaciones de voltajes. El sintetizador estará conformado por varios módulos intercambiables, con el fin de poder manipular la señal de diferentes maneras, de acuerdo con la intención del músico. Este instrumento tendrá la capacidad de ser controlado por un controlador externo mediante comunicación MIDI, un protocolo que envía datos sobre la velocidad, tiempo, paneo y la nota que se toca en el teclado. Se construirá un amplificador para poder reproducir las señales emitidas por el sintetizador y escucharlas en tiempo real, así como grabarlas en un software de audio. El siguiente documento muestra el proceso realizado para analizar y construir cada uno de los módulos.

Gran parte de la música que se escucha actualmente, sin importar el género que se escuche, está compuesta por sonidos creados con instrumentos acústicos, así como por instrumentos eléctricos y por sonidos que no provienen de ninguno de los anteriores. Dichos sonidos se producen a partir de un proceso llamado síntesis de audio, producida por aparatos llamados sintetizadores. Los sintetizadores son considerados como instrumentos musicales que producen su sonido a partir de cambios de corriente y voltaje y no por vibraciones de cuerdas o de membranas. Estos instrumentos están categorizados como electróforos.

Los sintetizadores suelen ser instrumentos un poco complicados de comprender y aún más complicado suele ser aprender a utilizarlos, pues muchos contienen una gran cantidad de botones, potenciómetros, switches y demás. Esta tesis tiene como fin analizar, comprender e implementar distintos módulos de un sintetizador analógico modular, como lo son el oscilador, filtro, y envolvente con el fin de aprender su funcionamiento y poder explicarlo de una manera más fácil de digerir para alguien sin conocimientos de ingeniería. Además, se implementará una fuente de poder capaz de alimentar varios módulos a la vez.

Este trabajo está estructurado de la siguiente manera. Primero se explica a detalle qué es un sintetizador y sus distintas presentaciones. Se describe el funcionamiento de cada uno de los módulos a estudiar para obtener un conocimiento general de lo que cada módulo debería realizar. Luego de esto se incluye el proceso realizado para su análisis e implementación.

Para lograr los objetivos estipulados se realizaron simulaciones de los circuitos, que facilitaron su análisis. Luego se construyó cada módulo en una placa perforada para poder ser estudiado en un laboratorio con el equipo adecuado y así se obtuvieron distintos resultados. Se comparó los resultados obtenidos con los esperados para luego obtener conclusiones, tomando en cuenta los objetivos de este trabajo.

### 2.1. Objetivo general

Construir un sintetizador de audio capaz de crear y modificar sonidos mediante distintos módulos y con la habilidad de ser controlado externamente y de grabar sus sonidos en un programa de edición de audio.

### 2.2. Objetivos específicos

- Construir un oscilador controlado por voltaje que reproduzca una onda en forma de diente de sierra para procesarla con un módulo que genere una señal envolvente, que modifique parámetros del audio como lo son el ataque, sustain y release, así como implementar un filtro que funcione como pasa bajas y con resonancia.
- Construir un amplificador capaz de reproducir la señal analógica con la mejor calidad posible, para grabarlo en un programa de computadora programado para grabar audio, reproducirlo, aplicarle efectos de tiempo, y guardar lo grabado en formato wav.
- Diseñar una fuente de poder capaz de alimentar todos los módulos del sintetizador.

---

### Justificación

---

La síntesis de audio es una forma de crear nuevos sonidos a partir de la manipulación de voltajes, con el objetivo de hacer música con los mismos. Conforme la tecnología avanza, el manejo y/o manipulación de los dispositivos de audio (sintetizadores, digital audio work stations, controladores, etc.) se vuelve cada vez más compleja, lo que provoca que muchas personas sin el conocimiento necesario de tecnología se vean intimidados frente a tantos aparatos. El objetivo de este trabajo es estudiar cada uno de estos elementos que conforman el entorno de la 'música electrónica' con el fin de comprenderlos en su totalidad para, posteriormente, contribuir en la comunidad del audio creando dispositivos y programas más intuitivos para reducir la curva de aprendizaje necesaria para dominarlos, alentando así a los usuarios a no tener miedo de aprender a usarlos. Este proyecto también tiene como fin innovar en el ámbito del comando de circuitos analógicos mediante controladores digitales. El sintetizador será capaz de variar el valor de sus potenciómetros mediante comunicación MIDI con un controlador externo. El software únicamente controlará un motor que girará el potenciómetro en el módulo que se encuentre, logrando que su circuito no deje de ser analógico. En el mundo de la música y de la síntesis de audio, es muy valioso. La ventaja de poder controlar el sintetizador de esta manera, entre muchas otras, es que el usuario podrá guardar presets de alguna configuración que sea de su agrado en un software, teniendo la capacidad de poder volver a ese preset cuando le plazca sin tener que digitalizar la señal para lograrlo.



### 4.1. Síntesis de audio y sintetizadores

El sonido tiene 4 características: intensidad, tono, timbre y duración. La intensidad se refiere a la amplitud de las ondas acústicas, comúnmente se le llama volumen. El tono es la frecuencia a la que las ondas oscilan; entre más alta es la frecuencia, más agudo el sonido y entre más baja es la frecuencia, el sonido es más grave. El timbre es la cantidad de armónicos que contiene un sonido, así como la intensidad de cada uno de ellos. Esto se traduce en la riqueza sonora que puede producir un instrumento. El timbre es lo que nos ayuda a diferenciar el sonido de un violín del de una trompeta, por ejemplo, incluso si ambos instrumentos suenan a la misma frecuencia. Por último, tenemos la duración, que significa el tiempo que tarda un sonido desde que comienza a emitirse hasta que desaparece totalmente.

La síntesis de audio es la manipulación de la electricidad para producir señales eléctricas, análogas a ondas acústicas. Dichas señales, al conectarse a un amplificador y un altavoz, producen señales acústicas capaces de ser percibidas por el oído humano. Un sintetizador es un aparato creado con componentes electrónicos, capaz de crear sonido y variar las características del sonido mencionadas anteriormente. La creación de dichos sintetizadores es lo que dio pie a la creación de la "música electrónica" dichos sintetizadores fueron popularizándose con el tiempo hasta ser el fenómeno mundial que es hoy.

#### 4.1.1. Sintetizadores digitales y analógicos

Originalmente, los sintetizadores se fabricaban con componentes lineales y no lineales, con la aparición del diodo y el transistor, lo que significa que por años los únicos sintetizadores que existían eran analógicos. Sin embargo, conforme la electrónica digital avanzó, se crearon los sintetizadores digitales, que funcionaban mediante una computadora que generaba señales a partir de valores discretos, convertidas a señales analógicas mediante un DAC y suavizadas por un filtro pasa bajas.

La principal diferencia entre los sintetizadores analógicos y digitales es que los analógicos son continuamente variables. Esto significa que la cantidad de formas en las que se puede modificar una señal es infinita. Los sintetizadores digitales, al formar señales discretas, pierden un poco esa cualidad sonora y cálida que posee un sintetizador analógico, aunque, cada vez, los digitales son



Figura 4.1: El 12 de octubre de 1964, Robert Moog revela el primer sintetizador controlado por voltaje.

mejores en cuanto a simulación del sonido analógico.

#### **4.1.2. Clases de sintetizadores analógicos según su configuración**

Los sintetizadores analógicos se clasifican en 3 tipos según la flexibilidad de interconexión entre módulos[12]. El primer tipo es el sintetizador normalizado. Los sintetizadores normalizados contienen arreglos de switches que permiten interconectar los módulos mediante el uso de estos. Esto genera una limitación para el usuario en cuanto a qué módulos pueden ser conectados entre sí, pero vuelve el sintetizador un poco más sencillo de utilizar, al ser reducidas las opciones de configuración. El segundo tipo son los sintetizadores modulares 4.1. Estos sintetizadores se colocan comúnmente en una caja, usualmente de madera, y se instala cada módulo por separado. Los módulos contienen salidas y entradas, que pueden ser interconectadas mediante cables, que suelen ser de audio (cables TS de 1/8") o "banana jacks". Este tipo de sintetizadores tiene 2 ventajas, que son el incremento en la posibilidad de interconexión de módulos y la posibilidad de agrandar el sintetizador obteniendo más módulos; pero esta flexibilidad lo vuelve mucho menos intuitivo, comparado con un sintetizador normalizado. El tercer tipo de sintetizador es el híbrido, que es una mezcla entre un sintetizador normalizado y uno modular.

#### **4.1.3. Control por voltaje (CV)**

La Figura 4.1 menciona un sintetizador controlado por voltaje. Esto significa que es posible variar parámetros a partir de incrementos y decrementos en el voltaje. La mayoría de los módulos en un sintetizador analógico tienen la capacidad de ser controlados de esta manera. Los principales bloques controlados por voltaje son los siguientes:

- Osciladores Controlados por Voltaje(VCOs).
- Filtros Controlados por Voltaje(VCFs).
- Amplificadores Controlados por Voltaje(VCAs).

Los módulos listados anteriormente serán explicados más adelante.

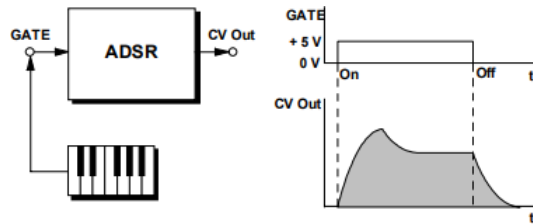


Figura 4.2: El diagrama de bloques de un módulo ADSR (izquierda) muestra cómo se conecta a un teclado a dicho módulo. Las gráficas de voltaje vs tiempo (derecha) muestran el efecto que un gate, emitido por el teclado, tiene en el módulo ADSR[7].

### Otros tipos de señal emitida por el sintetizador

Existen tres tipos de señales emitidas por un sintetizador analógico, cada una, por convención, no sobrepasa de los 10V de pico a pico.

- CV, mencionado anteriormente.
- Señales de audio, producidas por módulos generadores, como el VCO o un módulo de ruido blanco, por ejemplo.
- Señales trigger y señales Gate, que comienzan un proceso o función. Este tipo de señal no es CV, debido a que simplemente oscila entre 2 estados, alto y bajo. Algunos módulos como el ADSR, requieren de un gate a la entrada para generar una señal CV a la salida.

## 4.2. Oscilador Controlado por Voltaje (VCO)

El VCO es el módulo generador de tonos, y generalmente producen más de una forma de onda. Dependiendo de la forma de onda, se reproducen distintos armónicos, lo que da una sonoridad distinta a cada onda(4.4). Con suficiente práctica es posible diferenciar los tipos de onda.

Musicalmente hablando, un generador de onda cuya frecuencia es modificada por un potenciómetro no es muy útil. Hacer música sería bastante difícil de esta manera. Para que el VCO sea práctico debe tener la capacidad de ser controlado por voltaje (CV). Al contar con esta capacidad, se puede ingresar un voltaje DC al oscilador y este produce una frecuencia; al ingresar un voltaje diferente, se produce un cambio en la frecuencia. Es común que un VCO tenga dos potenciómetros, uno "fine", para poder afinar el oscilador.

Robert Moog ideó una forma de utilizar un cv de forma exponencial, conocido como voltio por octava (V/oct). Esto quiere decir que, si se ingresa 1V y el generador produce la nota Do, entonces al ingresar 2V se produce también la nota Do, pero una octava más arriba o, lo que es lo mismo, la frecuencia es el doble de la anterior. También es posible tener una entrada CV lineal, en la que un incremento de 1V para una señal de 300Hz significa un aumento de 100Hz, es decir un cambio a 400Hz. Esta entrada se usa generalmente para producir efectos de vibrato en la señal.

Para ondas cuadradas también es posible cambiar su ancho de pulso y darle un sonido diferente dependiendo del ciclo de trabajo seleccionado.

Los VCOs generan las diferentes formas de onda a partir de 2 formas principales, triangular y diente de sierra. Esto se logra tomando una de estas dos señales, cuya frecuencia es directamente



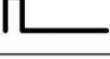



Waveform Name	Wave Shape
Sawtooth	
Ramp	
Rectangle/Pulse	
Square	
Sine	
Triangle	

Figura 4.3: Tipos de onda[12].

proporcional a la corriente en el circuito convertidor de voltaje lineal a corriente exponencial, y, mediante circuitos modificadores de señal, se produce cualquier tipo de onda.

#### 4.2.1. ¿Por qué un convertidor exponencial?

En el párrafo anterior se menciona un convertidor exponencial. Este circuito es necesario para algunos módulos tales como el VCO debido a la naturaleza del oído humano. Nuestro sentido del oído percibe las frecuencias de forma logarítmica, lo que significa que para nuestros oídos la diferencia entre 400Hz y 800Hz es igual a la diferencia entre 1000Hz y 2000Hz[10]. El oído también percibe la intensidad de los sonidos de esta manera. Por eso es común encontrar este tipo de circuito en módulos de amplificación como el Amplificador Controlado por Voltaje (VCA).

Esto no significa que un voltaje de control no pueda utilizarse linealmente. Como se menciona anteriormente, en los VCOs suele agregarse una entrada CV lineal, para poder modificar la frecuencia de manera más sutil y agregar efectos como el vibrato o trémolo, para el VCA.

### 4.3. Envoltente (EG)

Antes de describir lo que realiza el envoltente, es necesario describir que es el envoltente acústico. El envoltente acústico se refiere a la serie de características que describen la evolución temporal de la amplitud de cualquier sonido.

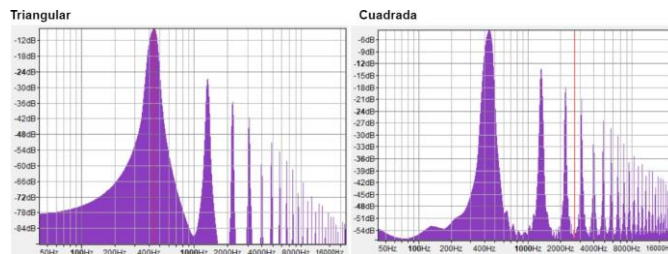


Figura 4.4: Contenido armónico de una onda triangular y una cuadrada, ambas a 440Hz.

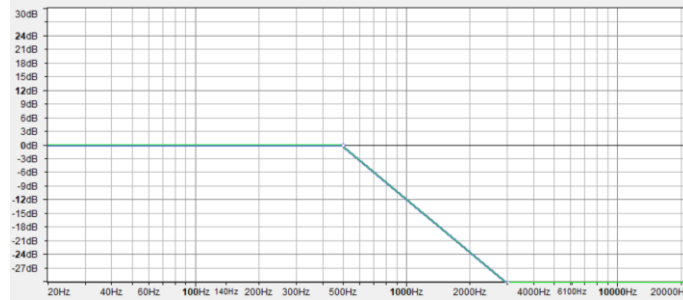


Figura 4.5: Filtro pasa bajas.

El envolvente o Envelope Generator (EG) es un módulo que produce un voltaje de control a la salida a partir de un impulso(gate) a la entrada. Los 2 tipos de envolvente más usados son los siguientes:

## 4.4. Filtro Controlado por Voltaje (VCF)

Los filtros son esenciales en el diseño sonoro y la síntesis sustractiva, al igual que el resto de música, no solo electrónica, sino cualquier tipo de música. Un filtro es un circuito que atenúa frecuencias específicas y permite el paso de otras. Existen distintos tipos de filtros, dependiendo de las frecuencias que atenúan y de la forma en que atenúan la señal. Los tipos más comunes son el filtro pasa altas, pasa bajas y pasa banda. También se utilizan algunos como el notch, wave filter y combinaciones de todos los anteriores. Se usará de ejemplo el filtro pasa bajas, para estudiar el efecto que tiene en una señal.

### 4.4.1. Filtro pasa bajas

El filtro pasa bajas atenúa las frecuencias mayores a su frecuencia de corte y, dependiendo del orden del filtro, las atenúa con mayor o menor agresividad.

La Figura 4.5 muestra un filtro pasa bajas con una frecuencia de corte de 500Hz. La frecuencia de corte es la frecuencia en la que el filtro atenúa 3dB. Dicho filtro atenuará las frecuencias superiores hasta llegar a casi 3KHz. Luego de eso, elimina totalmente las frecuencias.

## 4.5. Sintetizador modular y diseño Eurorack

Eurorack es un formato de sintetizador modular creado por Dieter Doepfer (Doepfer Musikelektronik GmbH). Básicamente, es una versión miniaturizada de los primeros sintetizadores creados por Roland y Moog [2]. Varias empresas han adoptado este formato, con lo cual se ha conseguido un estándar de dimensiones para los paneles de un módulo, haciendo posible que una persona pueda comprar módulos de distintos fabricantes e intercambiarlos con facilidad en su sintetizador.

### 4.5.1. Dimensiones del formato Eurorack

El formato Eurorack se basa en el formato Eurocard, que es un formato europeo para tamaños de placas de circuito impreso. Se utilizan las medidas horizontales "Horizontal Pitch (HP)" donde 1

HP equivale a 5.08mm, y las medidas verticales U, donde 1U equivale a 44.45mm.

La Figura 4.6 muestra un rack de 2 filas, cada una de 3U, y un ancho de 84HP[7]. El rack debe poseer otras partes adicionales para poder entregar poder a los módulos. Una fuente de poder(2), conectada a un "bus board"(1), para poder entregar poder a cada módulo mediante cables ribbon, un enchufe(3) y todas las interconexiones necesarias para que pueda conectarse a una toma de corriente.

Teniendo en cuenta las especificaciones mencionadas anteriormente, se crean los paneles frontales de los módulos del sintetizador. Cada panel debe ser de 3U(133.4mm) de alto, teniendo en cuenta el borde del riel en el que se atornillan los paneles, se recomienda evitar que éste sobresalga. El ancho de los paneles (medido en HP) depende del fabricante. Doepfer recomienda colocar 2 tornillos por panel en los paneles que llegan hasta 10HP. Para mayores tamaños, recomienda usar 4 tornillos. La Figura 4.7 muestra la distancia a la que se colocan los tornillos; estos deben ser de 3.2mm. Doepfer también recomienda reducir un poco el ancho de los paneles, para tener un poco de tolerancia entre cada uno al instalarlos (Tabla 4.1). Cada panel se conecta al bus board mediante un cable ribbon, esto se detallará en el capítulo 4.5.

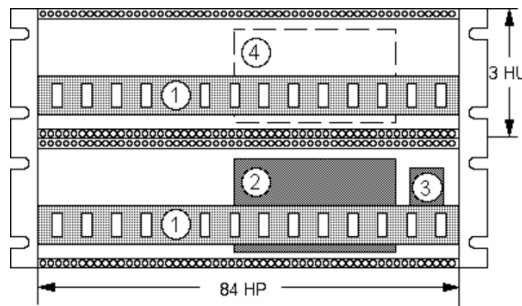


Figura 4.6: Sistema estándar para rack de 6U, doble fila[7].

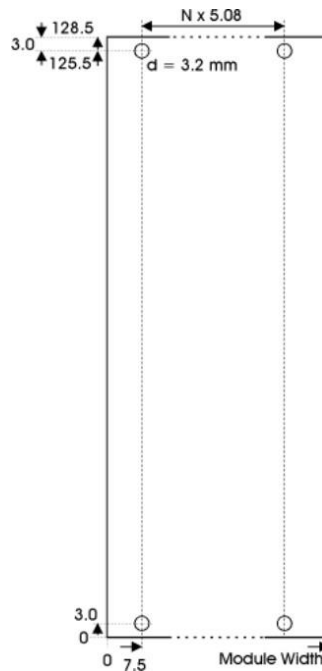


Figura 4.7: Posición de los tornillos en un panel para Eurorack[7].

Ancho del módulo (HP)	Ancho del módulo calculado (mm) (= múltiplos de 5.08 mm)	Ancho real (mm)
1	5.08	5.00
1.5	7.62	7.50
2	10.16	9.80
4	20.32	20.00
6	30.48	30.00
8	40.64	40.30
10	50.80	50.50
12	60.96	60.60
14	71.12	70.80
16	81.28	80.90
18	91.44	91.30
20	101.60	101.30
21	106.68	106.30
22	111.76	111.40
28	142.24	141.90
42	213.36	213.00

Tabla 4.1: Ancho de panel, en HP y en mm.

Cabe mencionar que el rack tomado como referencia está hecho de metal. Actualmente, los creadores de sintetizadores DIY prefieren crear un rack de madera por motivos estéticos, para poder personalizarlos y hacerlos más vistosos. Sin embargo, los rieles siguen siendo de metal debido a que son más fuertes que uno hecho con madera. Así mismo, el material de los paneles no siempre se realiza con aluminio de 2mm de espesor, como lo fabrican las empresas grandes. Algunas personas optan por crear paneles de acrílico o mdf, para hacer sus módulos más originales.

Anteriormente se comentó brevemente que existen varios módulos controlados por voltaje. A continuación, se explicará con detalle cómo funciona cada uno de estos módulos. Sin embargo, se hará énfasis en los módulos relevantes para este trabajo.

## 4.6. Fuente de poder

La mayoría de los módulos de un sintetizador eurorack se alimentan con +12V y -12V, pues el estándar de amplitud de una señal es de 10Vpp y esto permite poder entregar esa amplitud sin distorsionar. Algunos sintetizadores también necesitan que se les entregue 5V, para realizar algún control CV o alimentar un microcontrolador si es que el sintetizador es digital o si cuenta con alguna pantalla.

Al construir una fuente de poder para un sintetizador se debe tomar en consideración la capacidad de eliminar el ruido más que la eficiencia de la fuente ([9]). En este caso es importante minimizar el ruido entregado al sintetizador ya que esto puede ensuciar la señal y producir sonidos indeseados a la salida. Tomando lo mencionado anteriormente en cuenta se puede comparar los destinos tipos de fuente de poder.

### 4.6.1. Fuentes lineales y conmutadas

Los dos tipos de fuentes de alimentación más comunes son las fuentes conmutadas y las fuentes lineales. Ambos tipos son utilizados actualmente y uno es más efectivo que el otro dependiendo de

los requerimientos del usuario.

Las fuentes lineales funcionan rectificando la señal AC proveniente del toma corriente. luego de eso se filtra con capacitores y se regula con un regulador de tensión.

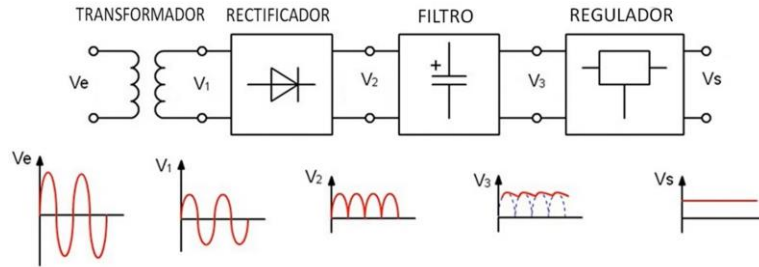


Figura 4.8: Diagrama de etapas de una fuente de alimentación lineal([1]).

La Figura 4.8 muestra las etapas que atraviesa una señal AC hasta convertirse en un voltaje DC. Este tipo de fuentes suele ser poco eficiente, pues disipa gran parte de su energía en forma de calor, además de ser pesada [3]). Sin embargo, este tipo de fuente tienen un costo muy bajo de fabricación debido al bajo número de componentes y casi no presenta ruido.

Las fuentes conmutadas funcionan a partir de un transistor en conmutación. que entrega una señal PWM al transformador, cuyo ciclo de trabajo es regulable para controlar el voltaje DC a la salida. Este tipo de fuente es el más común actualmente debido a que son mucho menos pesados y mucho más eficientes. La Figura 4.9 muestra las etapas de una fuente conmutada.

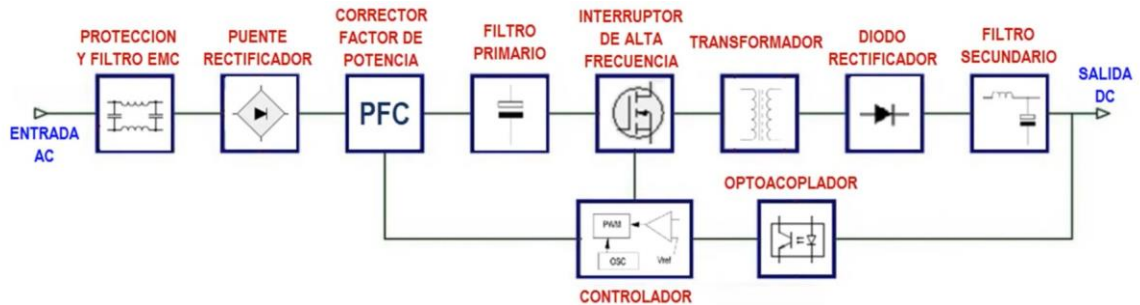


Figura 4.9: Diagrama de etapas de una fuente de alimentación conmutada ([1]).

La siguiente Tabla(4.2), obtenida del libro "Power Supply Cook Book"([3]) muestra los beneficios y contras con los que cuenta cada fuente y las compara entre sí. conociendo las características de cada fuente es posible discernir qué tipo de fuente es más conveniente para alimentar un sintetizador. La principal característica a considerar es el ruido. Esto es suficiente para descartar por completo la fuente conmutada, que es muy ruidosa. El peso no es una característica esencial para la aplicación que se le dará, pues un sintetizador modular no está diseñado para moverlo de lugar regularmente y el costo de producción es mucho más bajo para una fuente lineal que para una fuente conmutada, por lo que a fuente lineal es la ideal para alimentar el sintetizador.



	<b>Fuentes lineales</b>	<b>Fuentes conmutadas</b>
<b>Costo</b>	Bajo	Alto
<b>Peso</b>	Alto	Bajo-medio
<b>Ruido</b>	Ninguno	Alto
<b>Eficiencia</b>	30-50 %	70-85 %
<b>Múltiples salidas</b>	No	Sí
<b>Tiempo de producción</b>	1 semana	8 meses

Tabla 4.2: Tabla de comparación entre una fuente conmutada y una fuente lineal.

## 4.7. Buffers y acoples AC

Los sintetizadores modulares, o cualquier dispositivo electrónico que sea atravesado por una señal AC, se presentan ante el reto de producir una señal lo más fielmente posible. Esto quiere decir que la señal a la salida de un módulo debe ser igual a la señal de entrada, si es que no se manipula intencionalmente. Esto es un problema no trivial, pues él no acoplar las impedancias entre etapas puede resultar en una pérdida de información bastante grande.

Un buffer es un circuito que presenta una alta impedancia de entrada a la entrada y una baja impedancia de salida ante una señal que desee pasar a través de él. Además, un buffer debe tener una ganancia de 1, lo que significa que la amplitud a la entrada es igual a la salida. El buffer más simple y efectivo está construido con un amplificador operacional en configuración de seguidor de voltaje. Un amplificador operacional es efectivo como buffer, pues tiene una gran impedancia de entrada y una impedancia muy baja a la salida.

Otro problema a resolver es el acople AC. Algunas señales contienen un componente DC, lo que provoca que no esté centrada en 0V. Si la señal atraviesa un amplificador operacional con este offset es posible que se distorsione debido a la incapacidad del amplificador de proveer un voltaje mayor al de su alimentación.

La solución a este problema es el acople AC. Esto consiste en colocar un filtro pasa altas entre la salida de una etapa y la entrada de la siguiente. El filtro debe tener una frecuencia de corte lo suficientemente baja para no afectar las frecuencias audibles, bloqueando así la señal DC y centrando la onda en 0V.

## 4.8. Comunicación MIDI

MIDI (Musical Instrument Digital Interface) es un estándar utilizado para transmitir y almacenar datos musicales, originalmente diseñado para sintetizadores. MIDI no transmite señales de audio. En lugar de esto, envía información sobre notas musicales, información sobre tonos y tiempo, para que el dispositivo que recibe la información pueda utilizarla para producir sus propios sonidos.

Existen dos tipos de bytes enviados por MIDI: status bytes y data bytes.

### 4.8.1. Status bytes

Sirven para identificar el tipo de mensaje, es decir, el propósito de los “data bytes” siguientes. Con la excepción de los mensajes en tiempo real, los status bytes siempre dan la instrucción al receptor de adoptar un nuevo status, incluso si el último mensaje no fue completado.

- **Running status:** cuando un byte de estado es recibido, el receptor permanece en ese estado hasta que un estado diferente sea recibido. De este modo, si un byte de estado nuevo fuese recibido, este puede ser omitido opcionalmente para que únicamente los bytes de datos sean enviados. Con un “running status” un mensaje completo puede consistir solo de bytes de datos.
- **Unimplemented status:** cualquier byte de estado y byte de datos que siga, recibido para funciones no implementadas en el receptor debe ser ignorado.
- **Undefined status:** cualquier mensaje que no esté definido debe ser ignorado si es enviado al receptor, para no causar problemas al sistema.

### 4.8.2. Data bytes

Se refiere a la información que se envía después del “status byte”. Normalmente son uno o dos bytes y estos contienen la información del mensaje. Para cada byte de estado se debe enviar el número correcto de bytes de datos. El receptor debe ignorar cualquier byte de datos que no sea precedido por un byte de estado válido (con la excepción de los “running status”).

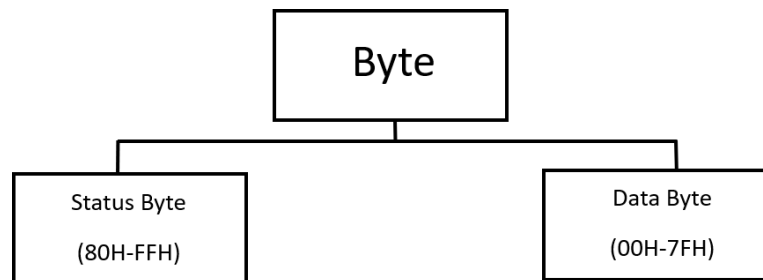


Figura 4.10: Tipos de bytes MIDI.

### 4.8.3. Tipos de mensajes

Existen dos tipos de mensajes: de canal y de sistema.

**Mensajes de canal:** utiliza cuatro bits de byte de estado para enviar el mensaje a uno de los 16 canales MIDI y cuatro bits para definir el mensaje. Entonces los mensajes de canal son dedicados para ser recibidos por un sistema cuyo número de canal concuerda con el número codificado en el byte de estado.

**Mensajes de sistema:** estos no están codificados con números de canal. Hay tres tipos de mensajes de sistema: Común, tiempo real y exclusivo.

- **Común:** dirigidos a todos los receptores sin importar el canal.
- **Tiempo real:** son utilizados para sincronización entre unidades. Solamente contienen bytes de estado, no de datos.
- **Exclusivo:** pueden contener cualquier número de bytes de datos, y pueden ser terminados por un End of Exclusive (EOX) o cualquier byte de estado, con la excepción de los mensajes de tiempo real. Estos mensajes contienen la identificación del fabricante, ya que, si el receptor no reconoce la identificación, debe ignorar la información que proceda.

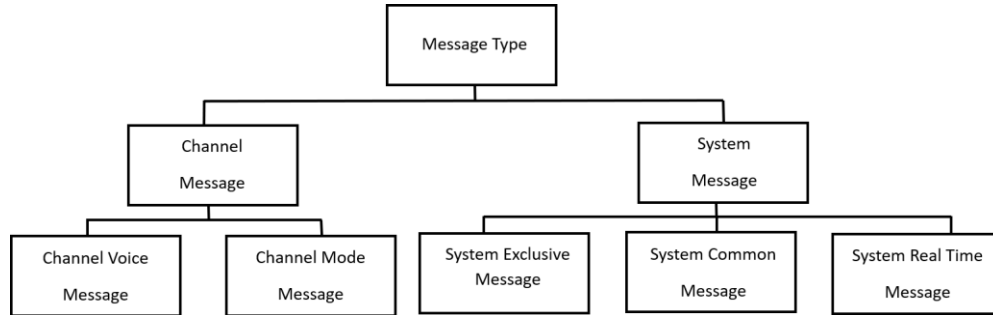


Figura 4.11: Tipos de mensajes MIDI.

Los tipos de información más comunes enviados por MIDI son:

- Tiempo en que las notas suenan.
- Velocidad y presión: que tan fuerte la nota fue presionada y sostenida.
- Pitch bend: la deflexión de una nota producida por una rueda.
- Mensajes de inicio y pausa.
- Metrónomo.
- Cambio de programa.

Una conexión MIDI puede transmitir hasta 16 canales de información, lo que significa que se puede controlar hasta 16 sintetizadores, programas y cajas de ritmos con un solo controlador. El estándar se basa en tres tipos principales de conexión.

- MIDI in: recibe datos.
- MIDI out: envía datos.
- MIDI thru: Replica la información recibida por el puerto MIDI IN para conectar en serie hasta 4 dispositivos.

**Diagrama de conexión MIDI** La interfaz MIDI opera a 31.25 Kbaudios, asíncrono, con un bit de inicio, 8 bits de datos y un bit de apagado, para un total de 10 bits y un período de 320 microsegundos por byte serial. El bit de inicio es un 0 lógico y el de apagado un 1 lógico. Se envía el bit menos significativo de primero. MIDI se comunica entre dispositivos mediante comunicación UART. El circuito funciona con menos de 5mA. Una salida debe estar conectada únicamente a una entrada. Para evitar errores de datos, el transmisor y el receptor están separados por un optoacoplador. Se utiliza un conector DIN de 5 pines, donde los pines 1 y 3 no se conectan, y el pin 2 debe mantenerse desconectado en MIDI In. La tierra en los jacks no debe estar conectada a ninguna otra tierra en otro circuito o en el chasis.

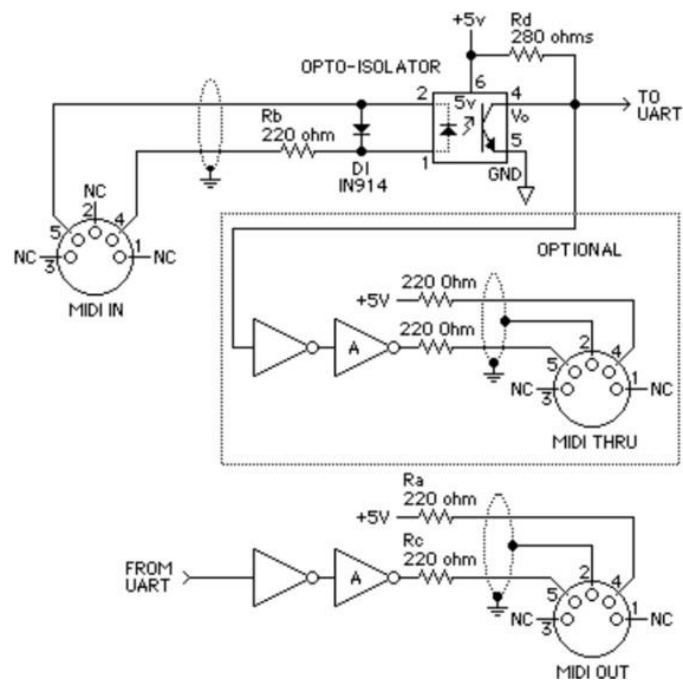


Figura 4.12: Esquemático del circuito para la comunicación MIDI mediante un cable DIN de 5 pines.

## CAPÍTULO 5

---

### Alcance

---

Los sintetizadores modulares son instrumentos electrónicos comúnmente usados en la música moderna y en todos los géneros musicales, desde la música pop hasta la electrónica y el rock. Los músicos que utilizan estos instrumentos se enfrentan comúnmente a sintetizadores construidos por ingenieros que no toman en cuenta la complejidad de la interfaz de usuario que es el panel frontal. Comúnmente, las indicaciones para su uso incluyen demasiados tecnicismos de ingeniería que un músico no conoce y no es su trabajo conocer.

El alcance de esta tesis es de carácter descriptivo y explicativo, pues se estudió este instrumento para luego poder ser explicado con mayor facilidad a los músicos de Guatemala. Se pretende realizar un análisis del circuito de cada módulo del sintetizador modular para comprender qué es lo que hace cada uno y de esta manera entender de forma general cualquier otro módulo en el mercado que cumpla la misma función, pero con circuitos distintos. La construcción del circuito permitirá realizar pruebas en el laboratorio que muestren el funcionamiento real de los circuitos y encontrando posibilidades de mejora para futuros proyectos.

Se construyó el sintetizador para poder observar el comportamiento de los circuitos al interactuar entre ellos. Se tuvo en cuenta el estándar Eurorack de la industria, para realizar módulos capaces de interconectarse e instalarse entre sí, en un espacio capaz de abarcar todos los módulos, alimentándolos efectivamente. Los circuitos son analógicos en su mayoría, pero deberán ser capaces de interconectarse con circuitos digitales, como lo es un controlador MIDI y un convertidor de MIDI a voltaje.

## CAPÍTULO 6

---

### Metodología

---

Para realizar el sintetizador, primero se investigó acerca de los distintos tipos de sintetizadores, estándares de audio y el comportamiento adecuado de cada uno de los módulos a construir.

Se hizo un análisis del funcionamiento de cada módulo. Dicho análisis fue respaldado por simulaciones en el programa de simulación de circuitos LTSpice. Se construyó cada circuito en el programa y se elaboraron gráficos que demuestren el comportamiento de los mismos.

Luego de comprobar que las simulaciones funcionan, se construyó cada circuito en una placa perforada. Se soldaron los componentes de tal manera que el circuito esté listo para montarse en un panel, para luego ser montado en un rack. Con el equipo de laboratorio, se comprobó el funcionamiento de cada módulo y se tomaron capturas del osciloscopio que demuestren si los resultados eran los esperados o no y por qué.

## 7.1. VCO

El oscilador controlado por voltaje es el módulo principal de un sintetizador, pues se encarga de generar una el sonido. Todos los VCOs generan sus señales a partir de un oscilador principal o core oscilator". Se simuló y analizó el circuito de la Figura 7.1.

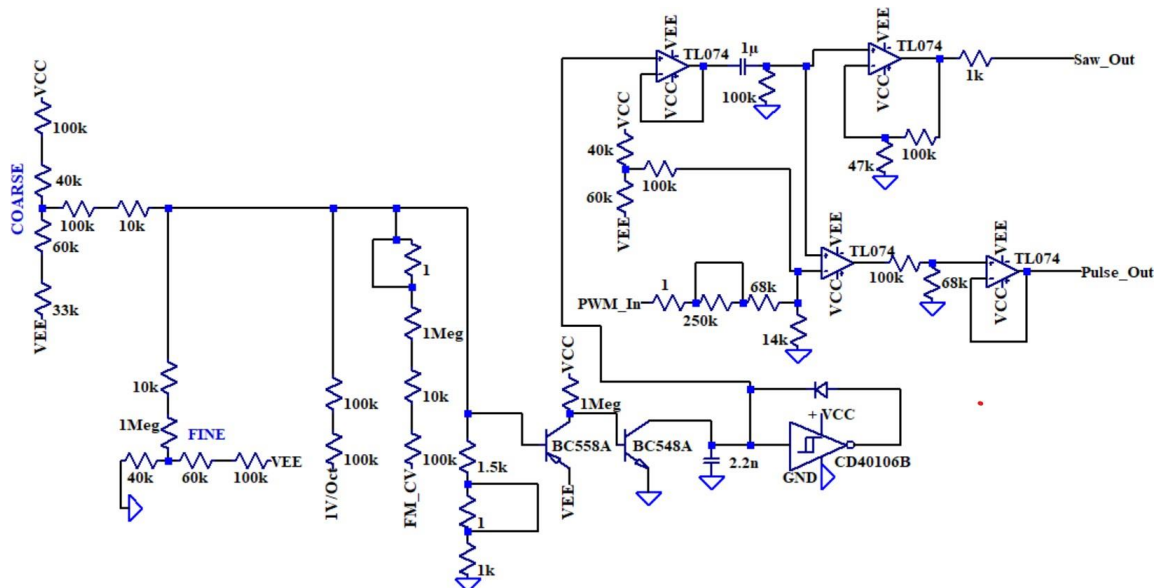


Figura 7.1: VCO diseñado por Moritz Klein en colaboración con Erika Sinths.

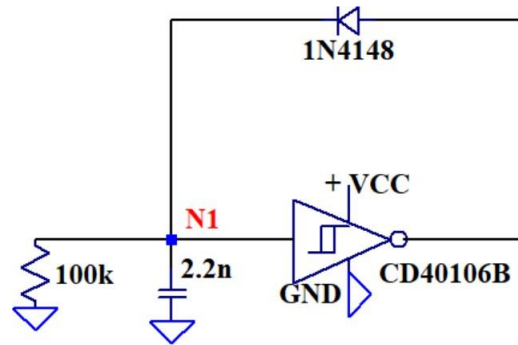


Figura 7.2: Oscilador principal del VCO.

### 7.1.1. Oscilador principal

El oscilador principal de este módulo genera una onda de diente de sierra para producir a la salida tanto la misma como una señal PWM. El oscilador funciona a partir de un Schmitt trigger inversor, una resistencia y un capacitor (figura 7.2) [5]. El funcionamiento es el siguiente: El comparador Schmitt trigger tiene dos niveles de referencia, uno inferior y uno superior. Cuando el voltaje a la entrada es menor que el nivel inferior, se dispara un voltaje de salida alto. La salida se mantendrá así mientras el voltaje a la entrada no se encuentre sobre el nivel superior. Si esto ocurre, el voltaje a la salida se vuelve bajo, hasta que el voltaje a la entrada sea menor al nivel inferior, haciendo que el ciclo se repita. La Figura 7.3 muestra la señal analógica de entrada (input) y una señal digital a la salida (output).

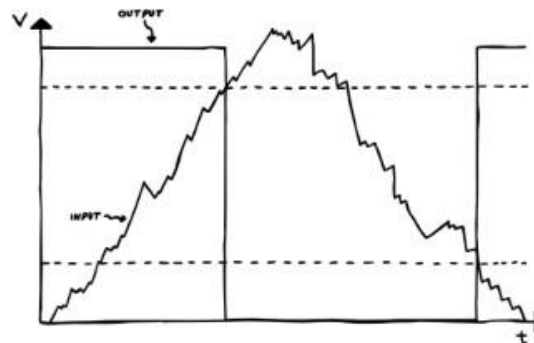


Figura 7.3: Funcionamiento del comparador Schmitt Trigger

La onda con forma de diente de sierra se genera de la siguiente manera. En un tiempo 0, cuando el Schmitt Trigger no sensa nada a la entrada, es decir, conmuta a saturación positiva. En este caso, la saturación positiva cuando la entrada está debajo de 4.5V. Luego, la corriente fluye desde la salida, a través del diodo, hacia el nodo N1 (Figura 7.2). En este momento el capacitor C1 comienza a cargarse rápidamente y, ya que la resistencia impide un flujo libre hacia tierra, el voltaje comienza a aumentar a tal punto que se alcanza un valor lo suficientemente grande para causar una conmutación a saturación negativa. En este caso el valor para dicha conmutación es de 7.5V aproximadamente. Ya que no hay ninguna corriente proveniente de la salida del Schmitt Trigger, el capacitor comienza a descargarse a través de la resistencia. Ya que la resistencia es grande, el voltaje cae lentamente, hasta alcanzar los 4.5V necesarios para volver a saturación positiva. La Figura 7.4 muestra la gráfica de voltaje vs tiempo del generador de señal diente de sierra.



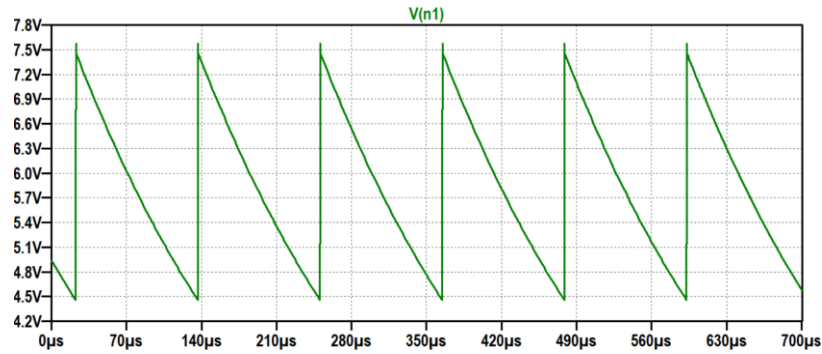


Figura 7.4: Onda con forma de diente de sierra, generada a partir del circuito de la Figura 7.2.

Luego de generar la señal, es necesario hacer un par de ajustes a la misma antes de la siguiente etapa. En primer lugar, se debe realizar un acople de impedancias para evitar la carga entre etapas y evitar ruido ([9]). Se puede apreciar en la imagen previamente mencionada que la señal no está centrada en 0. Para evitar posibles problemas de saturación en la siguiente etapa, se debe realizar un acople AC. La Figura 7.5 muestra el circuito con un bufer y un acople AC a la salida del oscilador principal. La Figura 7.6 muestra la señal sin acople AC y con acople, con colores azul y verde, respectivamente.

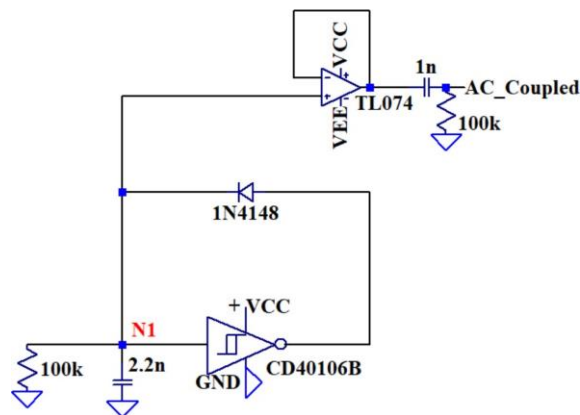


Figura 7.5: Oscilador principal con acople AC.

### 7.1.2. Cambio de frecuencia

Para que el oscilador sea más musical se debe poder manipular la frecuencia. El período de la señal depende únicamente de su segunda fase y, a su vez, la segunda fase depende de que tan rápido se descarga el capacitor. Para variar la frecuencia es necesario modificar la resistencia. También debe tomarse en cuenta que la relación entre las notas es exponencial, es decir, si la frecuencia de la nota La es 440Hz, el siguiente La, también llamada su octava, se encuentra al doblar dicha frecuencia (880Hz), el siguiente La se encuentra a 1760Hz, y así sucesivamente. De acuerdo con el estándar de 1V/Oct (1 Voltio por Octava), cada aumento de octava corresponde a un aumento de exactamente 1V, por lo que se debe poder manipular exponencialmente la frecuencia con un voltaje lineal. Un transistor resuelve este problema, pues un cambio lineal en el voltaje a la base significa un cambio exponencial en la corriente que fluye entre colector y emisor.

Sin embargo, el voltaje en la base del transistor debe ser muy pequeña para poder drenar al

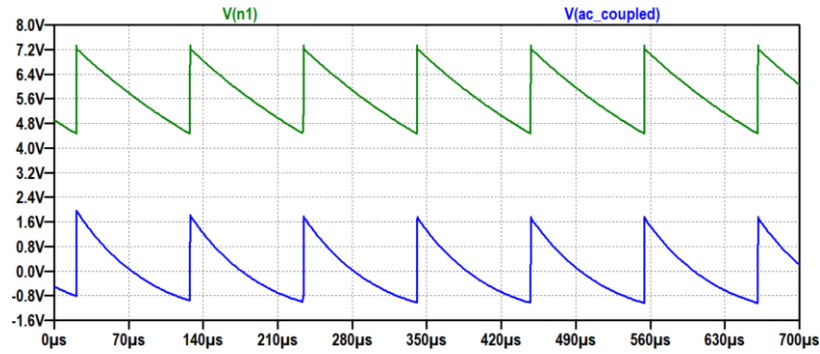


Figura 7.6: Onda original(verde) vs onda sin offset(azul).

capacitor, y que la señal cambie su frecuencia en un rango audible (entre 350 y 550 mV). Este voltaje es demasiado pequeño teniendo en cuenta que se desea poder utilizar el estándar  $1\text{V}/\text{Oct}$ . Si se quisiera utilizar un teclado de 5 octavas, entregaría un voltaje de hasta 5V al transistor. Será necesario realizar una escala del voltaje CV para que sea funcional.

Antes de escalar el voltaje, se debe solucionar un problema relacionado con el transistor BC548. Debido a que el comportamiento de los transistores BJT depende mucho de la temperatura, una pequeña variación podría causar que la frecuencia fluctúe de forma indeseada. Los NPN, como el BC548, suelen aumentar la corriente colector-emisor debido a la disminución de la resistencia en la unión PN, lo que significa un aumento en la frecuencia de nuestra oscilación. Lo contrario pasa con los transistores PNP. Es por eso que el circuito a estudiar contiene tanto un transistor NPN como un PNP, pues de esta manera, se cancelan los cambios en debido a la temperatura. Sin embargo, para que esto funcione, primero se debe tener un par de transistores con la misma tasa de cambio en el flujo de corriente debida a la temperatura, como es el caso del BC548 y el BC558. Luego, es necesario colocar ambos transistores lo más cerca posible en el circuito físico, para que ambos perciban los cambios de temperatura de la misma manera. El circuito de la Figura 7.1 muestra el transistor BC558 polarizado en configuración de colector común, de tal manera que entregue al BC548 el voltaje discutido en el párrafo anterior.

Para controlar y afinar el oscilador se utiliza un arreglo de resistencias para lograr que la entrada CV se adecúe al estándar  $1\text{V}/\text{Oct}$ . Para lograr esto, simplemente se debe reducir la cantidad de corriente a la entrada CV y cambiar el offset de la misma. Esto se logra colocando una resistencia de lo suficientemente grande a la entrada, colocando un potenciómetro de offset a 12V y -12V a través de un par de resistencias para reducir el voltaje y con un potenciómetro de precisión, para escalar la señal de una mejor manera. Se suele utilizar potenciómetros para afinar el oscilador ya que no todas las entradas CV suelen tener exactamente la misma amplitud.

### 7.1.3. Frecuencia modulada y una afinación más precisa

El circuito estudiado contiene un potenciómetro de afinación fina y FM o frecuencia modulada. Ambas partes son parecidas a las estudiadas anteriormente. El input FM es una entrada CV que permite señales alternas en lugar de voltajes DC. Esto es útil en el audio, pues da una cualidad sonora bastante agradable, como un vibrato en un violín, entre otras sensaciones. Fine tuning es un potenciómetro con una resistencia más grande, comparada con el potenciómetro de afinación previamente discutido, siguiéndolo, lo que crea un divisor de voltaje mucho mayor, logrando controlar la frecuencia en valores más pequeños.

### 7.1.4. Implementación de una señal PWM

El circuito brinda la posibilidad de utilizar tanto la señal con forma de diente de sierra como una onda cuadrada. Para lograr esto, se toma ventaja de la onda de sierra con la ayuda de un comparador. El amplificador operacional en configuración de comparador analiza el voltaje en la entrada positiva y lo compara contra el voltaje de la entrada negativa, generalmente llamada límite. Si la señal en la entrada positiva es mayor que el límite, a la salida se medirá un voltaje DC positivo de saturación. Si la entrada positiva es menor, lo contrario ocurre a la salida; y así se logra cambiar el ciclo de trabajo de nuestra señal PWM (Figura 7.7).

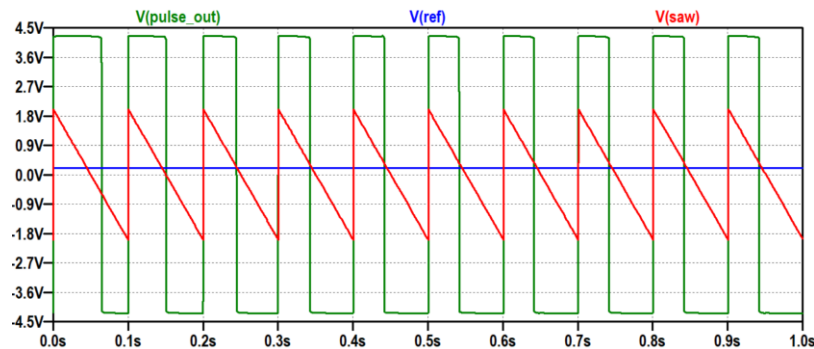


Figura 7.7: Gráfica de voltaje vs tiempo de las entradas de un comparador y su salida. La entrada positiva (rojo), la negativa(azul) y la salida(verde).

Para poder cambiar en ancho de pulso se debe cambiar el límite en la entrada negativa. Es por ello que el oscilador cuenta con un divisor de voltaje creado por una resistencia, además de un divisor de voltaje extra para adecuar la variación a la señal de la entrada positiva. De la misma manera se agregó un divisor de voltaje extra para poder controlar el ciclo de trabajo con CV.

El circuito termina adecuando ambas señales, diente de sierra y PWM, para que tengan un voltaje pico-pico de 10V, el estándar en los sintetizadores. Para la señal PWM, cuyo voltaje es casi 24V pico-pico, se aplica un divisor de voltaje para reducir su amplitud, seguido de un amplificador operacional en configuración de seguidor de voltaje, para acoplarlo con la siguiente etapa, además de una resistencia de 1k para evitar cortocircuitos. Para La señal de diente de sierra se aplica un amplificador, que cumple la función de acople con la siguiente etapa, seguido también por una resistencia de 1k. La Figura 7.8 muestra las secciones estudiadas en este análisis.

## 7.2. VCF

Un filtro RC es básicamente un divisor de voltaje dependiente de la frecuencia, ya que el capacitor presenta un decremento en su reactancia ante un incremento en la frecuencia, dado por la ecuación:

$$X_c = \frac{1}{\omega C} \quad (7.1)$$

donde  $\omega = 2\pi f$ , siendo  $f$  la frecuencia. Si se realiza un divisor de voltaje para dos resistencias  $R_1$  y  $R_2$

$$V_{out} = V_{in} * \frac{R_2}{R_1 + R_2} \quad (7.2)$$

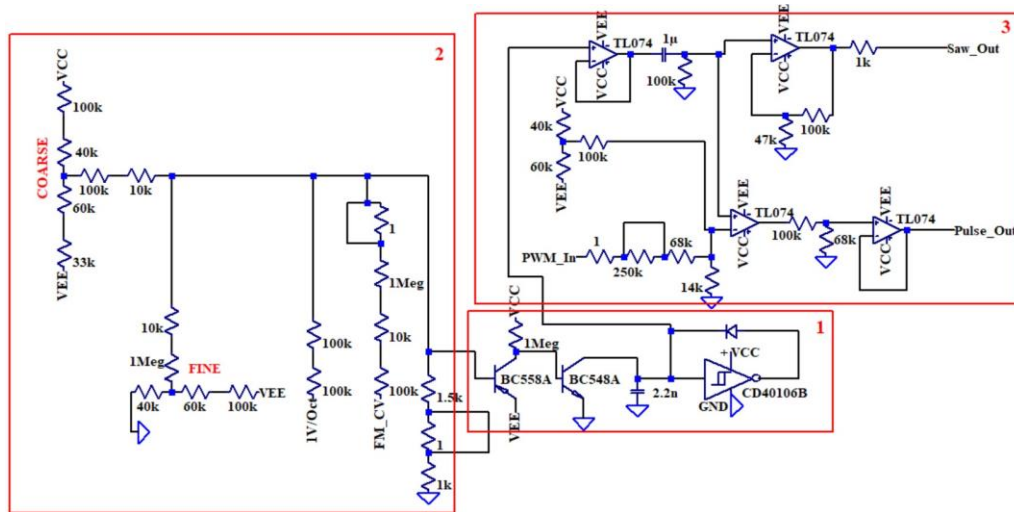


Figura 7.8: Secciones del circuito del VCO. 1. Oscilador principal, 2. Afinación y adecuación de la señal de entrada para controlar la frecuencia, 3. Señal PWM y etapa de salida.

sustituyendo R2 en 7.2 por  $X_c$  en 7.1

$$V_{out} = V_{in} * \frac{1}{R1 + \frac{1}{\omega C}} \quad (7.3)$$

simplicando la ecuación, podemos observar que la ganancia

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{1}{\omega R1C + 1} \quad (7.4)$$

es dependiente de la frecuencia e inversamente proporcional a la misma. Si se invierte el orden de la resistencia y el capacitor se obtiene un filtro pasa altas, de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{\omega R1C}{\omega R1C + 1} \quad (7.5)$$

La frecuencia de corte de un filtro es la frecuencia donde  $\omega = \frac{1}{RC}$ . Esto equivale a una ganancia  $(V_{out}/V_{in}) = 0.5$ . Sin embargo, esta ecuación es una aproximación, pues no se tiene en cuenta el desfase de la señal debida a la reactancia del capacitor. El valor real de la ganancia sería aproximadamente 0.7.

El filtro pasa altas suele utilizarse como acople AC, pues elimina las frecuencias bajas. Si se tiene en cuenta una señal DC como una frecuencia de 0Hz, entonces solo basta con seleccionar una frecuencia de corte lo suficientemente alta para eliminar la señal DC. No obstante, debe seleccionarse cuidadosamente el valor de la resistencia del filtro de acople, pues debe ser lo suficientemente grande para no impedir el paso de la corriente a la entrada, así como lo suficientemente pequeño para evitar cargas a la salida [4].

En esta sección se analiza el filtro pasa abajas llamado escalera de diodos, debido a su configuración y a la forma en que éste filtra el voltaje[6]. La Figura 7.9 muestra el esquemático del filtro.

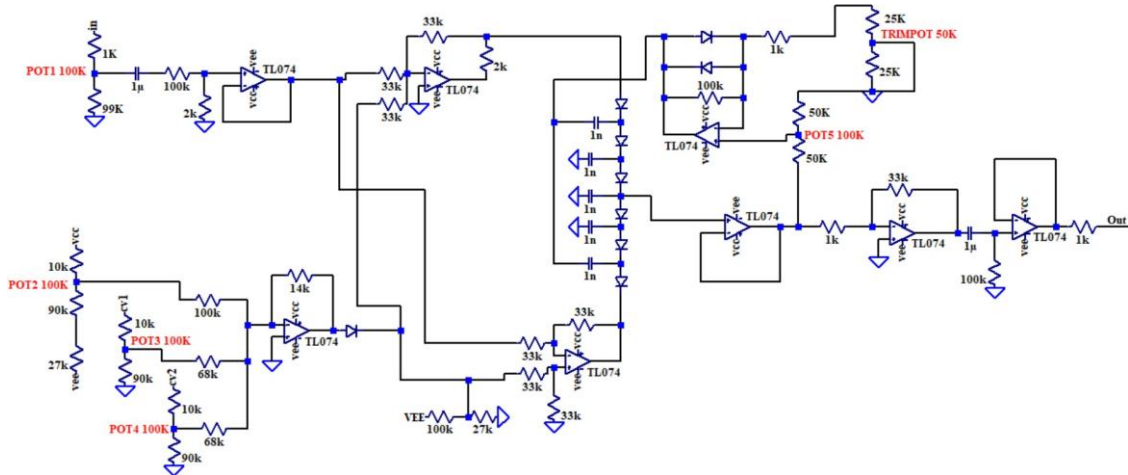


Figura 7.9: Módulo de filtro pasa bajas con resonancia para un sintetizador.

### 7.2.1. Filtros activos y pasivos

Si se quiere realizar un filtro pasa bajas de 2do o 3er orden, se debe colocar una configuración adicional de resistencias y capacitores, como en la Figura 7.10. Teóricamente esto triplicaría la atenuación de las frecuencias deseadas, manteniendo una ganancia igual a 1. Sin embargo, configurar las resistencias de esta manera produce un efecto no deseado, como lo es la pérdida de potencia o distorsión de la señal debida al mal acople de impedancias entre cada fase.

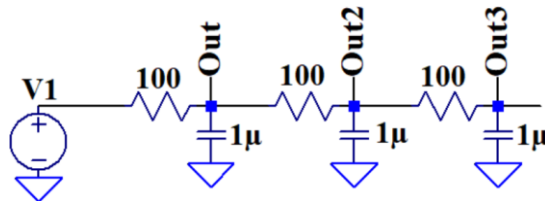


Figura 7.10: Filtro pasivo de 3er orden.

Para solucionar este problema se utilizan filtros activos. Los filtros activos utilizan componentes activos, como un amplificador operacional en configuración de seguidor de voltaje, para solucionar el problema del acople de impedancias. Ya que la impedancia de entrada es prácticamente infinita y la impedancia de salida es bastante pequeña, es el componente ideal para realizar un filtro de orden superior con la menor pérdida de información.

La Figura 7.13 muestra la gráfica de voltaje vs tiempo del filtro de la Figura 7.12. Se puede observar que las señales a la salida de cada filtro atenúan ciertas frecuencias, modificando la forma de la señal cuadrada a la entrada, la amplitud de la onda permanece casi intacta comparada con la gráfica de la Figura 7.11.

### 7.2.2. Resonancia

Generalmente, un circuito resonante consta de un inductor y un capacitor y alcanzan su resonancia cuando la reactancia capacitiva es igual a la reactancia inductiva. El circuito se comporta

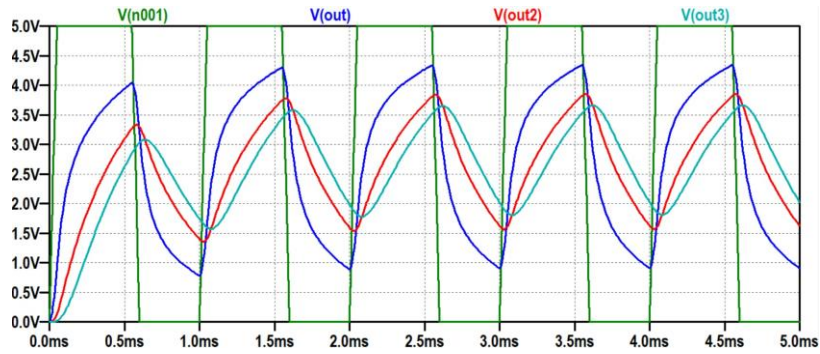


Figura 7.11: Análisis transiente del filtro de la Figura 7.10.

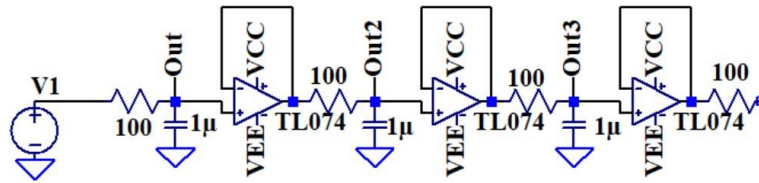


Figura 7.12: Filtro activo de 3er orden.

como si hubiese una reactancia infinita a la frecuencia de resonancia, prácticamente como un circuito abierto [8]. Sin embargo, el circuito a analizar no contiene inductores, su filtro se basa prácticamente en un filtro RC.

Normalmente, en un filtro RC, cuando la frecuencia de la señal se acerca a la frecuencia de corte, la amplitud aumenta, aunque en una proporción bastante pequeña. La resonancia en un filtro RC es dependiente de la frecuencia de corte. Para hacer que el filtro RF entre en resonancia es necesario conectar la salida de la última etapa con la pata que estaría conectada a tierra del capacitor de la primera etapa (figuras 7.14 y 7.14).

En un primer instante, si se tiene una señal cuadrada de 5V pico-pico a la entrada, al pasar de 0 a 5V, fluirá una corriente a través de la primera resistencia hacia el primer capacitor. Ya que la parte inferior del capacitor está conectada a la salida, en este instante, el voltaje en ese nodo es 0, por lo que es similar a conectarlo a tierra. Conforme el capacitor se carga, el amplificador seguidor comienza a aumentar su voltaje a la salida, haciendo que la segunda etapa entre en función y aumentando el voltaje a la salida del segundo seguidor. En este momento el voltaje en el nodo de la parte inferior del capacitor comienza a aumentar. Dicho voltaje es relativamente pequeño al inicio, por lo que la corriente seguirá fluyendo por el circuito, aunque cada vez con menor fuerza, pues el voltaje del primer capacitor disminuye conforme aumenta el voltaje a la salida. luego de un tiempo, el voltaje a la entrada alcanza los 5V entregados por la onda cuadrada pero, ya que la salida tarda un poco en responder a lo que pasa en la entrada, el voltaje continúa aumentando. Conforme el voltaje aumenta debajo del capacitor, el voltaje sobre este sobrepasará los 5V, creando una "sobre presión", causando también un voltaje mayor a 5V a la salida. Esta retroalimentación seguiría aumentando, de no ser por la resistencia a la entrada. Ya que el voltaje en la primera etapa ahora es mayor que el voltaje de entrada (5V), la corriente comenzará a fluir en sentido contrario, hacia la entrada. El voltaje a la entrada comenzará a decaer, creando el mismo efecto en cascada que lo hizo aumentar a más de 5V, pero en sentido contrario, provocando que el voltaje baje un poco debajo de 5 voltios, lo que hará que la corriente vuelva a fluir hacia el seguidor, repitiendo todo el proceso. Sin embargo, esta vez el capacitor no está completamente vacío, el efecto cascada será menor. Luego de un tiempo el filtro



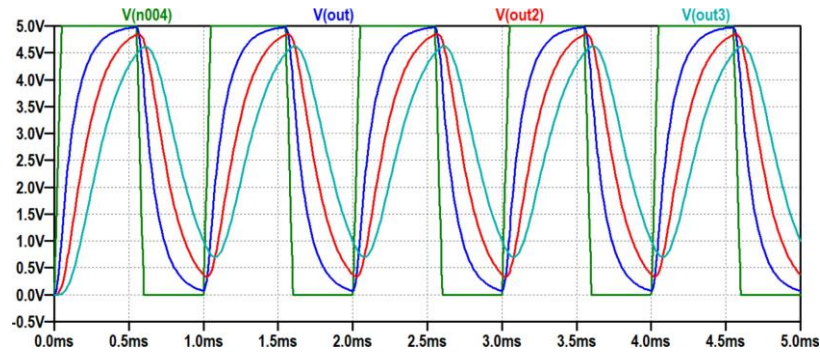


Figura 7.13: Análisis transiente del filtro de la Figura 7.12.

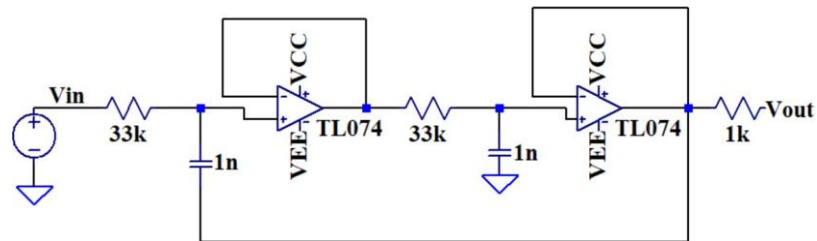


Figura 7.14: Filtro activo pasa bajas de segundo orden, con resonancia.

se estabilizará y permanecerá en 5V, hasta que la señal cuadrada a la entrada cambie su voltaje a -5V, repitiendo el proceso en sentido contrario.

Sin embargo, al conectar la salida del filtro a la parte inferior del capacitor C1 (Figura 7.14) se consigue una resonancia relativamente pequeña. La resonancia produce una sonoridad agradable y deseada por los compositores de música electrónica. Controlar la cantidad de resonancia es útil, por lo que el circuito utiliza, primero, un potenciómetro como divisor de voltaje, seguido por un amplificador operacional no inversor, con una ganancia de  $\frac{100}{68} + 1$ . Esta amplificación produce una saturación si el divisor de voltaje anterior al amplificador entrega un voltaje lo suficientemente grande. Para evitar este tipo de problemas, se redujo la señal de entrada mediante un divisor de voltaje a la entrada. No se redujo la ganancia del amplificador de resonancia, pues esto limitaría la cantidad de resonancia que se le puede aplicar. A la entrada del filtro, se colocó un capacitor de acople y un amplificador seguidor, para centrar la señal de entrada en 0 y evitar problemas de acople entre etapas (Figura 7.16).

Al haber limitado la señal de entrada en lugar de disminuir la ganancia en el amplificador de resonancia, es posible aumentar tanto la resonancia que el circuito ya no es capaz de corregir los cambios bruscos en el voltaje, convirtiendo la resonancia en oscilación (figuras 7.16 y 7.17).

### 7.2.3. frecuencia de corte modificada mediante CV

El filtro estudiado tiene como fin poder la frecuencia de corte mediante un voltaje DC, proveniente de algún módulo independiente. Controlar la frecuencia de corte de un filtro pasa bajas implica cambiar el valor de la resistencia conectada al capacitor. Si el filtro es de un orden superior a uno es necesario que el valor de las resistencias cambie de forma sincronizada, es decir, todas las resistencias deben tener siempre el mismo valor para poder variar la frecuencia de corte.

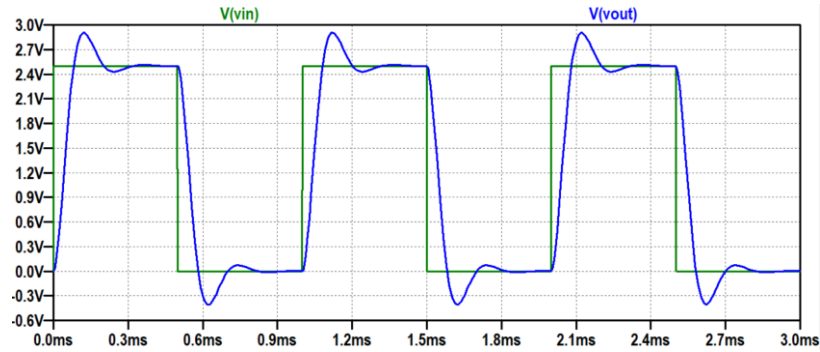


Figura 7.15: Gráfico de voltaje vs tiempo de una señal con resonancia (Figura 7.14).

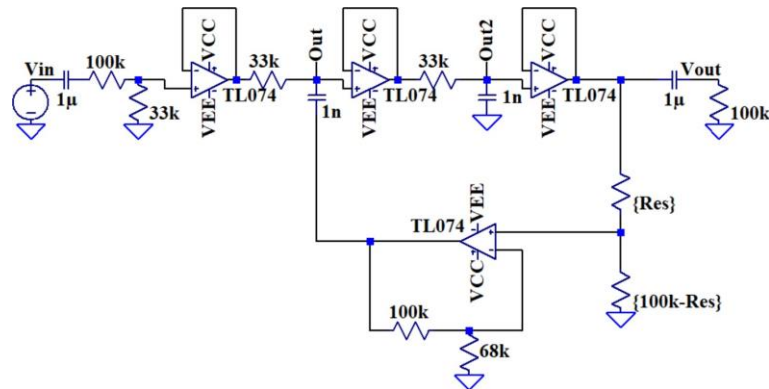


Figura 7.16: Filtro activo pasa bajas de segundo orden, con resonancia amplificada.

Ya que no existe una manera accesible ni barata de realizar lo expresado en el párrafo anterior, Moritz Klein [6] brinda una solución a este problema utilizando diodos como resistencias. Un diodo necesita percibir un voltaje mínimo de voltaje a su entrada para dejar fluir correctamente corriente. Para un diodo 1N4148 este valor es 0.7v. sin embargo, a voltajes menores, el diodo conduce una mínima cantidad de corriente, funcionando como una resistencia que cambia de valor de manera abrupta con un pequeño incremento en el voltaje de entrada. En una simulación en LTSpice, un voltaje de 300mV produce una corriente de 1.8uA, mientras que un voltaje de 400mV produce una corriente de 17uA. Esto quiere decir que para voltajes muy pequeños un diodo se comporta como una resistencia controlada por voltaje.

No obstante, conectar un diodo en lugar de una resistencia para realizar el filtro alteraría nuestra señal, pues el diodo no permite el paso de la corriente en sentido contrario. Conectar un diodo en paralelo y en sentido inverso tampoco solucionaría el problema, pues el cambio constante en el voltaje debido a la señal AC provocaría un brusco y continuo cambio en la frecuencia de corte, provocando una señal de salida totalmente diferente a la señal de entrada, dejando de funcionar efectivamente como un filtro.

#### 7.2.4. Escalera de diodos

Para poder utilizar los diodos como resistencias controladas por voltaje en el filtro, se debe colocar dos diodos como se observa en la Figura 7.18. Luego, se debe alimentar al circuito tal y como se muestra en la imagen. Ambas fuentes contienen la misma señal y con la misma fase, pero la fuente superior tiene un offset positivo y la inferior uno negativo. Con esta configuración se logra entregar



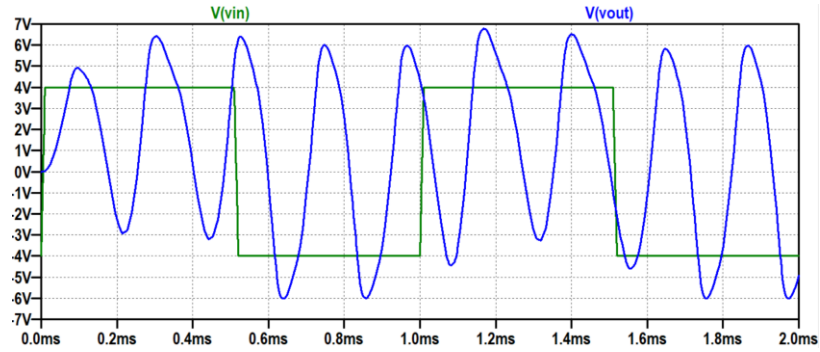


Figura 7.17: Gráfico de voltaje vs tiempo, oscilación causada por resonancia (Figura 7.16).

una corriente de bias ([6]) a los diodos. Esto significa que, ya que ambas oscilaciones están en fase y están desfasadas en la misma proporción y en sentido contrario, siempre fluirá una corriente estable a través de ellos. Una corriente constante implica que ambos diodos presentan una misma oposición a la corriente, es decir, una misma resistencia. Esta resistencia ahora es dependiente del offset de las 2 señales, ya que, al aumentar el offset de cada señal, se incrementa la corriente y así mismo la resistencia; ocurre lo opuesto al reducir el offset.

El voltaje entre los diodos es en relación a los diodos, ya que la diferencia de voltajes es la misma. Sin embargo, relativo a 0V, el voltaje entre los diodos es la mitad, como si se tratase de un divisor de voltaje hecho por dos resistencias del mismo valor. Este divisor de voltaje hace que nuestro capacitor, que está conectado a tierra, logre cargarse y descargarse efectuando de esta manera la función de un filtro. La Figura 7.19 muestra la señal a la salida del nodo entre los diodos.

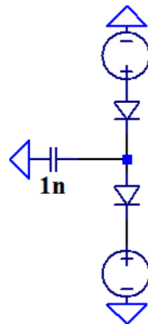


Figura 7.18: Filtro pasa bajas con diodos como resistencias.

Para crear un filtro con de orden mayor a uno se debe añadir dos diodos por cada incremento de orden. Esto quiere decir que, si se hace un filtro de 3er orden, se deben colocar cuatro diodos en serie, y 3 capacitores entre ellos conectados a tierra. Esto es necesario debido a que, para que los diodos formen un divisor de voltaje que produzca una onda centrada en 0 a la mitad, la resistencia debe ser la misma tanto arriba como debajo del divisor de voltaje. Además, el construir un filtro asimétrico (7.20) produciría un efecto no deseado, pues al no tener un capacitor central, se debe escoger uno para la señal de salida y al estar cada uno más cerca de una de las dos señales con offset, se cargará más rápido, en el caso del capacitor superior, o se descargará más rápido, en el caso del inferior(7.21).

Para alimentar y controlar el filtro, se crea dos copias de la señal de entrada. A una se le suma un offset y a la otra se le resta el mismo offset (Figura 7.22). Las flechas rojas indican la señal de entrada del módulo y la entrada CV para controlar la frecuencia de corte externamente. Para crear

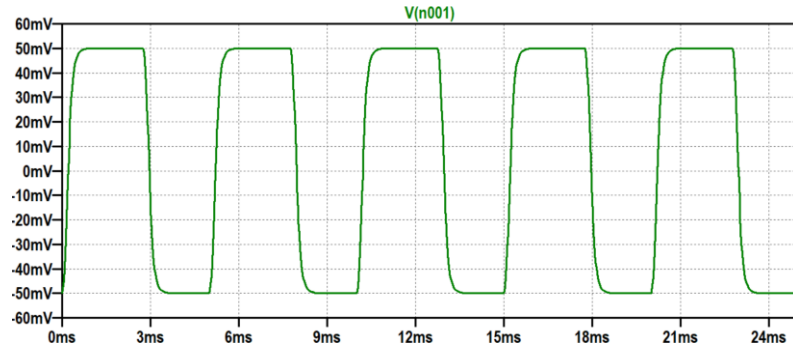


Figura 7.19: Gráfico de amplitud vs tiempo del filtro pasa bajas con diodos como resistencias (7.18).

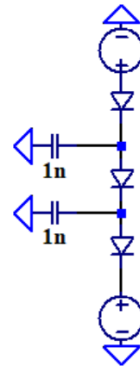


Figura 7.20: Filtro escalera de diodos con número par de etapas.

las señales con offset, se utiliza un amplificador sumador y un restador, encerrados en un cuadro rojo en la imagen con el número 1 y 2, respectivamente.

El voltaje a la salida para el amplificador sumador (1) es

$$V_{out} = -\left( I_n * \frac{33k}{33k} + CV * \frac{33k}{33k} \right) = -(I_n + CV) \quad (7.6)$$

y para el restador (2), el voltaje es

$$V_{out} = \left( \frac{33k}{33k} \right) (CV - I_n) = (CV - I_n) \quad (7.7)$$

El amplificador sumador es un inversor de voltaje, por lo que sumará la señal  $I_n$  con la señal  $CV$ , que ha sido invertida debido a un amplificador inversor a su entrada, por lo que la señal tiene un offset negativo, pero al invertirla, ese offset se vuelve positivo. Se debe tomar en cuenta que ahora esta señal está invertida respecto a la señal  $I_n$ , por lo que supondría una cancelación de la corriente que pasa por los diodos, de no ser por el restador, que invierte la señal de entrada al hacer la adición con la señal  $CV$  que, debido al inversor a su entrada, es negativa. Esto hace que ambas señales estén invertidas respecto a la entrada, pero en fase respecto a ellas mismas, por tanto haciendo que el filtro funcione correctamente.

Para procesar la señal  $CV$  se utiliza un amplificador sumador inversor, que se encarga de entregar la señal  $CV$  invertida discutida en el párrafo anterior. Este amplificador suma 3 señales. La primera

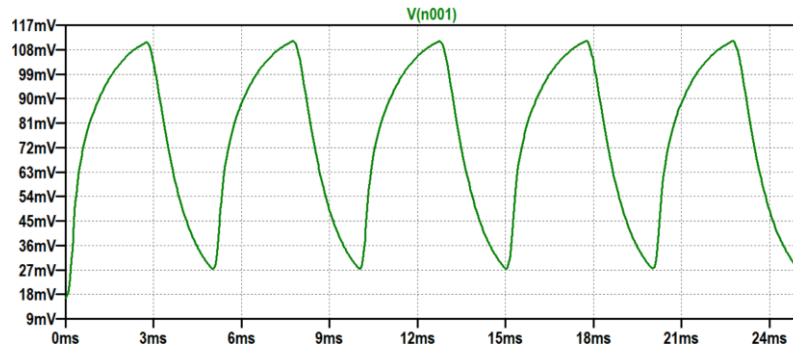


Figura 7.21: Gráfico de amplitud vs tiempo del filtro pasa bajas con diodos como resistencias(7.20).

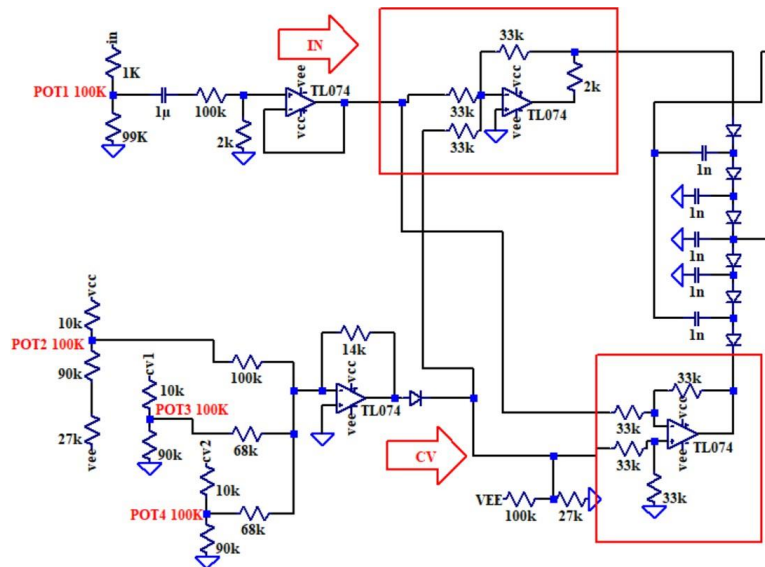


Figura 7.22: Sección del circuito encargada de controlar la frecuencia de corte del filtro.

es una señal DC, modificable mediante un potenciómetro, con una resistencia de 27KΩ conectada a -12V, para evitar que el voltaje baje demasiado por debajo de 0V, ya que eso podría cancelar la oscilación debido a que los diodos no conducirían corriente en sentido contrario. Adicionalmente, se encuentran 2 señales CV, propiamente reducidas con resistencias de 68KΩ. Luego del sumador, se tiene un diodo seguido por un divisor de voltaje, con un voltaje de -1.3V. la razón de esto es evitar que la señal CV sea menor a este voltaje, pues así se evita la posibilidad de eliminar la oscilación. Esto funciona ya que, al ser el voltaje a la entrada del diodo menor a -1.3V, la corriente intentará a fluir en sentido contrario, pero no podrá hacerlo debido al diodo.

Para que la escalera de diodos pueda ser resonante, se debe conectar la salida, al capacitor de la primera etapa. Sin embargo, en este caso, son dos los capacitores que realizan esta función, por lo que, para mantener la simetría de la onda, se conecta a los dos capacitores como se observa en la Figura 7.24. A la salida del filtro, se encuentra un potenciómetro de 100kΩ cuya función es crear un divisor de voltaje para reducir la señal a ser retroalimentada. El amplificador tiene dos diodos desde su salida hacia su entrada inversora. La función de estos diodos es disminuir la ganancia del amplificador si ésta aumenta demasiado, lo que causaría que los diodos del filtro dejen de funcionar como resistencias. Se colocó un potenciómetro de precisión conectando la entrada inversora a tierra para poder modificar a qué voltaje los diodos comienzan a conducir.

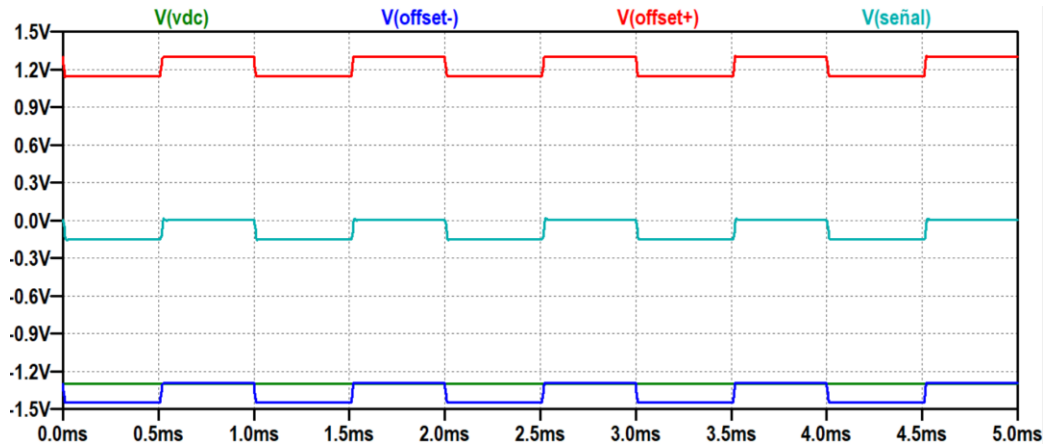


Figura 7.23: Gráfica de voltaje vs tiempo del circuito de la Figura 7.22. La línea verde indica el valor del voltaje CV a la entrada del sumador y el restador. Este valor es de aproximadamente -1.3V La señal de entrada está centrada en 0(Celeste). La señal de color rojo muestra la salida del sumador, invertida y desfasada 1.3V. La señal azul es la del restador, invertida y desfasada -1.3V.

Por último, se conectó un amplificador inversor a la salida del filtro, para que la señal a la salida sea de la amplitud estándar en un sintetizador eurorack. Luego se conectó un acople AC para centrar la señal y se añadió un buffer y una resistencia a la salida para asegurar un acople de impedancias y evitar cortocircuitos.

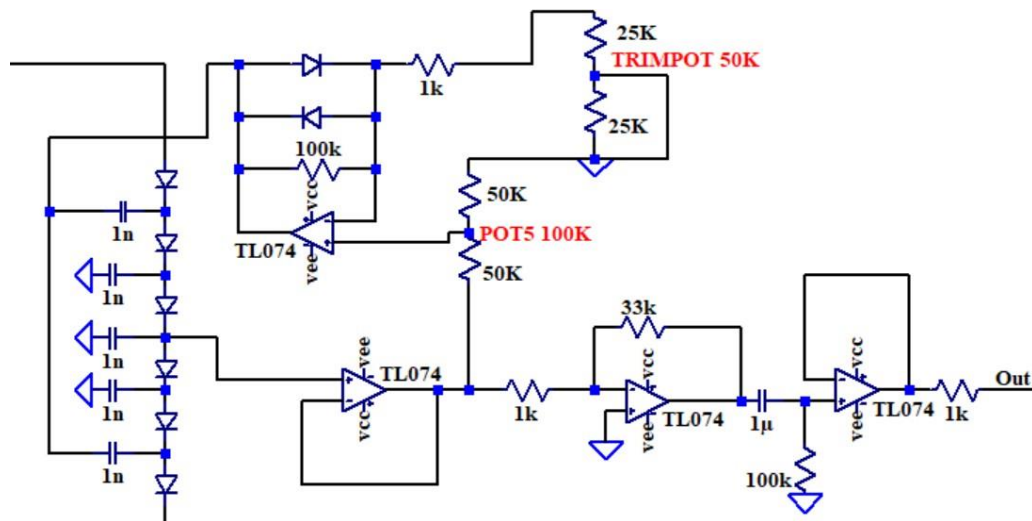


Figura 7.24: Amplificador de resonancia.

### 7.3. Envoltente

La señal del envoltente se compone de cuatro parámetros, comúnmente llamados attack, decay, sustain y release. En el módulo a estudiar, estos parámetros se forman a partir de voltajes DC y, con la ayuda de un filtro, se consigue la forma del envoltente.

La primera etapa del circuito es la encargada de generar los voltajes DC que serán moldeados

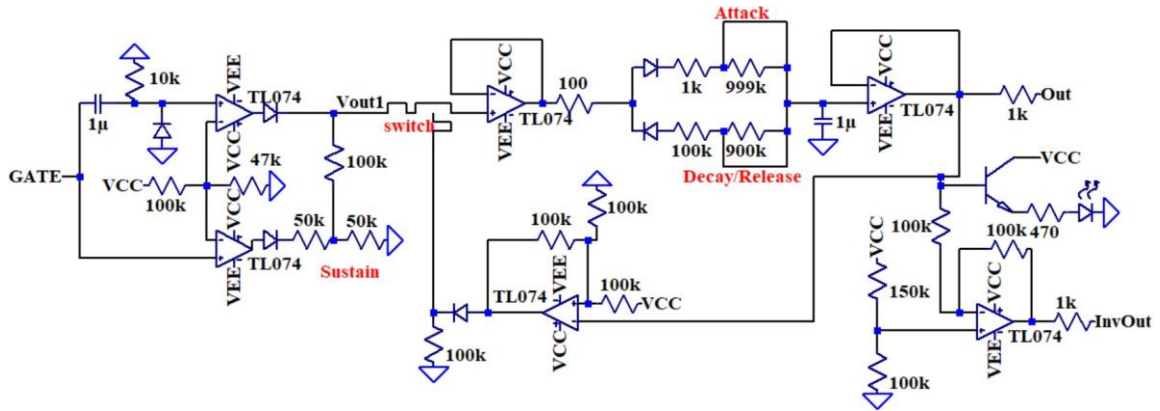


Figura 7.25: Circuito del módulo envolvente.

para crear el envolvente. La entrada del módulo recibe una señal gate, que es básicamente un pulso. El pulso entra en la terminal no inversora de dos amplificadores comparadores. En primer lugar, está el comparador superior, precedido por un capacitor de  $1\mu\text{F}$ , un diodo(D1) y una resistencia de  $10\text{k}\Omega$  (7.26). Esta parte es la encargada de generar el ataque y el decay, utilizando el pico positivo de voltaje producido por el filtro pasa bajas. El pico negativo se elimina a través del diodo, ya que no es necesario. Este pico es comparado con el voltaje de la terminal negativa del OpAmp cuyo valor es  $3.8\text{V}$ , producidos por el divisor de voltaje, lo que causa que el voltaje a la salida del comparador se dispare por un breve momento. Luego de que el pico producido por el filtro cae por debajo del voltaje de referencia, la salida del comparador caería a  $-12\text{V}$  pero, ya que no se necesita ningún voltaje negativo para en envolvente, se elimina cualquier voltaje negativo con un diodo a la salida. En la parte de abajo de la primera etapa se encuentra el segundo comparador, que se encarga de proveer y controlar el sustain. Su voltaje de referencia es el mismo y, al igual que la parte superior de la etapa, su salida está conectada a un diodo para evitar el flujo de la corriente en sentido contrario. Este comparador tiene la terminal positiva conectada directamente al gate, por lo que la salida producirá un voltaje alto al mismo tiempo que la entrada. A su salida, luego del diodo, está conectado un potenciómetro en configuración de divisor de voltaje, cuyo propósito es reducir la salida a voluntad para ser utilizada como referencia por el voltaje a la salida del comparador superior. Esto se logra mediante la resistencia de  $k$  conectada entre ambas salidas, pues al bajar el voltaje de la salida superior, se mantendrá en el voltaje producido por el divisor de voltaje, controlando así el sustain. La gráfica 7.28 muestra la salida de la primera etapa de color verde.

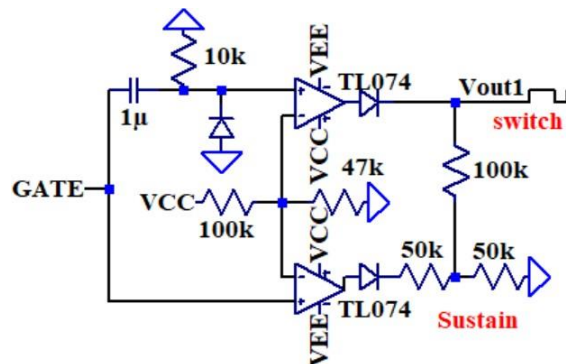


Figura 7.26: Envolvente Attack Decay Sustain Release, primera etapa.

una dinámica más musical. Básicamente, esta etapa filtra la señal DC de su entrada "suavizando" las esquinas gracias al capacitor C1 de la Figura 7.27. La configuración de esta parte del circuito permite controlar qué tan rápido se descarga el capacitor, gracias a los diodos D1 y D2. El ataque, que es la velocidad con la que se carga el capacitor, es controlado por el potenciómetro etiquetado como attack. Mientras más pequeño sea el valor del potenciómetro, más rápido se cargará el capacitor y más rápido será el ataque. El decay y el release son dos partes distintas del envolvente. No obstante, ambas partes significan la descarga del capacitor, por lo que se controlan con el mismo potenciómetro tal y como se observa con el divisor de voltaje con la etiqueta "Decay/Release". Al igual que el ataque, un valor pequeño de resistencia producida por el potenciómetro representa un decay y release más rápidos. Luego del filtro modificado se encuentra un amplificador seguidor, que sirve para crear un acople de impedancias con el otro módulo, seguido por una resistencia de 1kΩ para evitar cortocircuitos en caso de que se conecten dos salidas por equivocación. La Gráfica 7.28 muestra el voltaje a la salida de la primera etapa dibujado con color verde y el voltaje a la salida del módulo con color azul. En ella puede observarse cómo la salida no es más que el voltaje DC suavizado por el filtro.

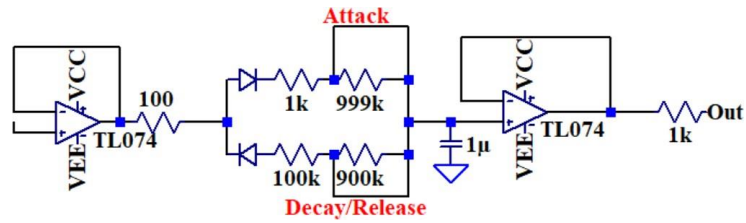


Figura 7.27: Envolvente Attack Decay Sustain Release, segunda etapa.

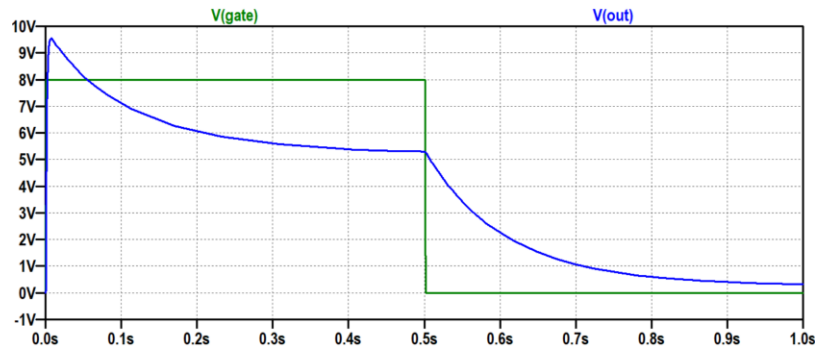


Figura 7.28: Gráfico de voltaje vs tiempo de la salida de la primera etapa (Vout1) y la salida del circuito (Out).

El módulo también cuenta con una salida invertida(7.29). Al invertir la señal, oscila entre 0 y -12V. Sin embargo, este circuito eleva el voltaje 6V para que la salida produzca exactamente el voltaje invertido de la salida no invertida.

El voltaje de salida del inversor se consigue con la siguiente ecuación:

$$\frac{6v - V_{out}}{100K\Omega} = \frac{V_{in} - 6V}{100k\omega} \quad (7.8)$$

Donde los 6V se obtienen del divisor de voltaje en la terminal positiva. Despejando para Vout se obtiene

$$V_{out} = 12V - V_{in} \quad (7.9)$$

La salida invertida puede observarse en la 7.30. Se puede apreciar que la salida invertida alcanza valores tan altos a la salida que se distorsiona debido a que el amplificador ya no puede entregar tanto voltaje. Para solucionar esto, se cambió el valor de la resistencia R17 por una de 150kΩ. De esta manera el offset ya no será de 6V, sino de 4.5V, evitando que entre en saturación (7.31).

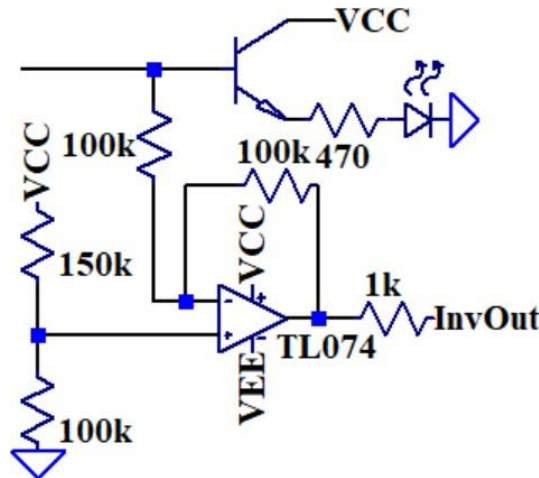


Figura 7.29: Salida invertida.

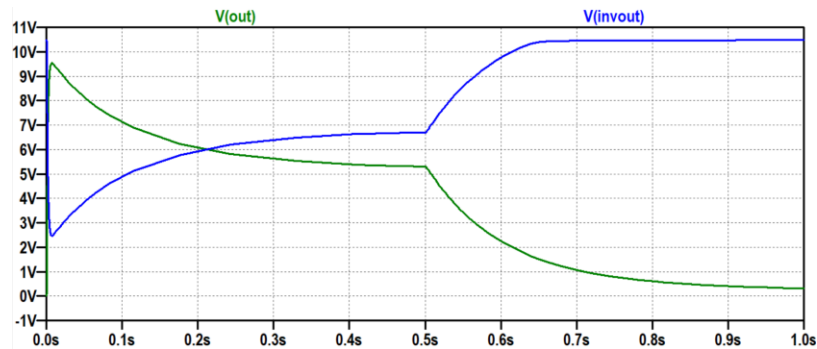


Figura 7.30: Gráfico de voltaje vs tiempo de la salida del circuito(Out) y su salida invertida (InvOut).

Para poder retroalimentar el envoltorio y así lograr que se reproduzca continuamente, el circuito cuenta con un comparador Schmitt Trigger, que produce un voltaje alto a la salida cada vez que el voltaje en la terminal negativa sea menor al umbral inferior, y producirá un voltaje bajo cada vez que la terminal negativa sobrepase el umbral superior. Los límites se consiguen con resolviendo las siguientes ecuaciones:

Para el umbral superior se calcula el voltaje en la terminal positiva cuando la salida del amplificador está en saturación positiva, es decir 12V (7.32). Ese voltaje será aproximadamente el mismo que el que debe entrar en la terminal negativa para entrar en saturación positiva.

$$U(th) = V_{cc} \frac{R14}{R14 + \frac{R15 \cdot R13}{R15 + R13}} \quad (7.10)$$



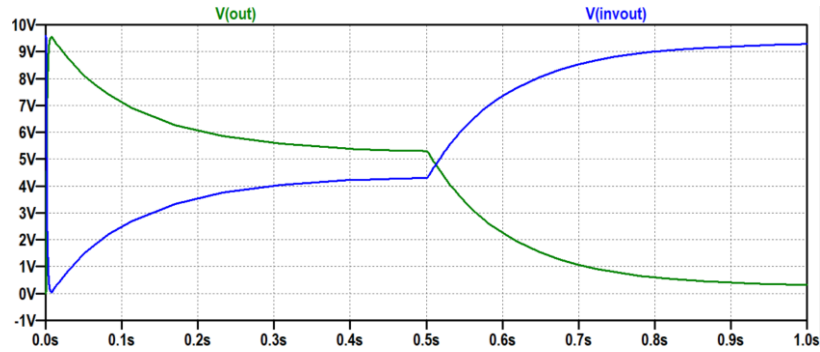


Figura 7.31: Salida invertida (InvOut) con offset de 4.5V.

Para el inferior se realiza el mismo proceso que con el superior, pero esta vez colocando el voltaje a la salida en saturación negativa (-12V).

$$L(th) = \frac{V_{out} - V_{CC}}{3} \quad (7.11)$$

Esto equivale a un voltaje en el límite positivo( $H(th)$ ) de 8V y un límite negativo ( $L(th)$ ) de 0V aproximadamente.

La Figura 7.33 muestra la señal de entrada del Schmitt Trigger en verde y con azul el voltaje a la salida del diodo siguiente a su salida. Es por eso que no se observan voltajes negativos, pues el diodo se encarga de impedirlos y la resistencia de 100kΩ ayuda a definir el voltaje en el buffer como 0V cuando no hay voltaje negativo.

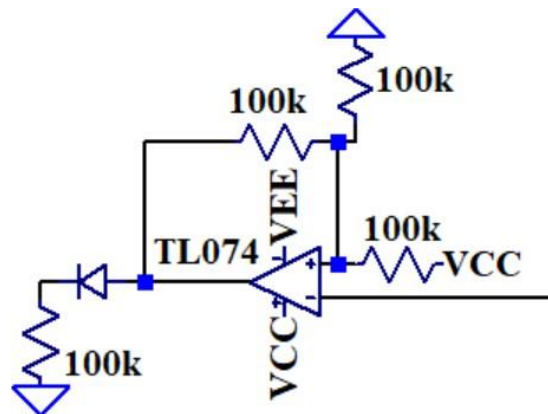


Figura 7.32: Etapa de retroalimentación para activar el envolvente continuamente.

## 7.4. Etapa de salida

El módulo de salida es muy importante para que el sintetizador sea funcional. La etapa de salida se encarga de adecuar la señal para poder ser escuchada con audífonos sin dañarlos. También se adecúa la señal para que tenga un nivel de línea. El nivel de línea un estándar para instrumentos musicales en el mundo del audio. Con la señal a este nivel es posible conectarla a bocinas o interfaces de audio, para poder ser grabada. El circuito de la Figura 7.34 cuenta con dos entradas, ya que también



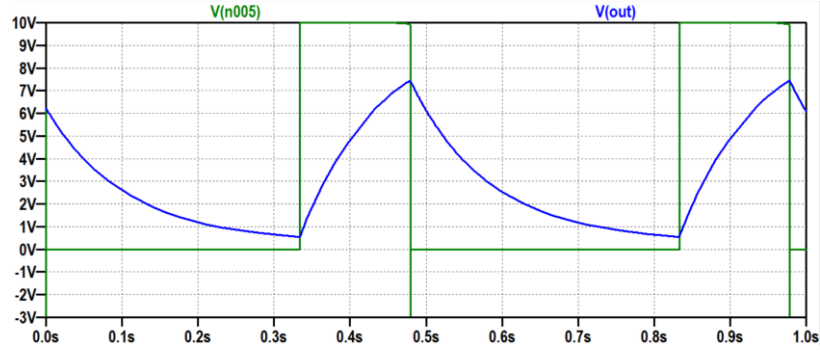


Figura 7.33: Gráfico de voltaje vs tiempo del "loop".

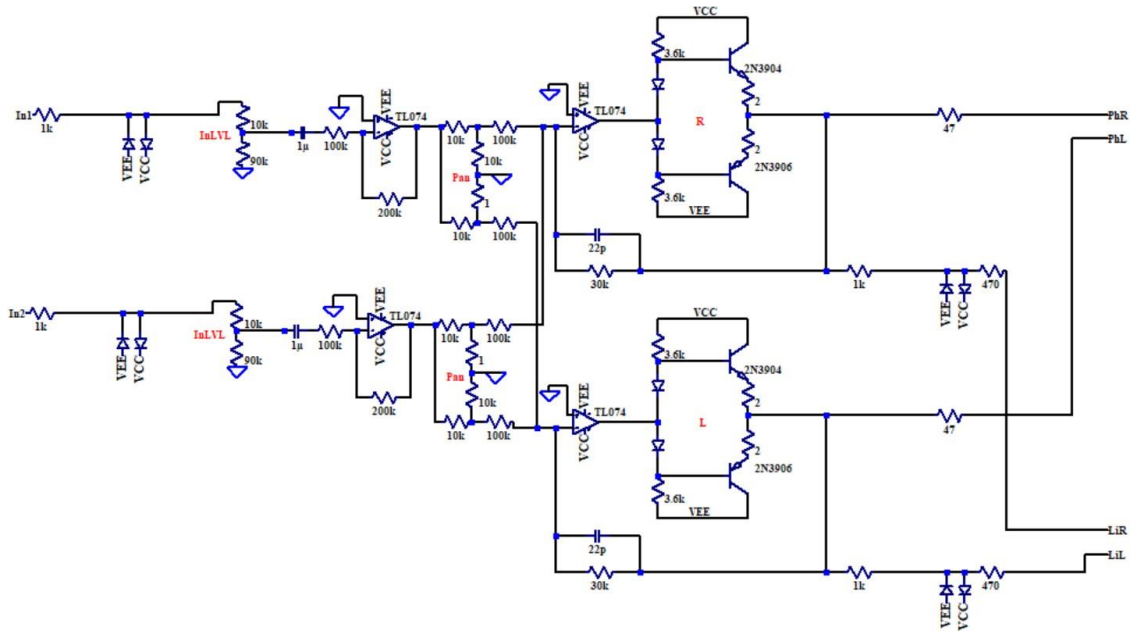


Figura 7.34: Circuito del módulo de salida.

funciona como mezclador, con la capacidad de panear las señales de entrada para decidir en cual de las dos salidas de la salida estéreo se escucharán las señales.

La Figura 7.35 muestra la etapa de entrada dividida en 3 secciones. La sección A las ambas entradas. Cada entrada contiene una resistencia y un par de diodos conectados a +12V y -12V. Estos componentes funcionan como protección del circuito contra sobre voltajes creados por descargas electrostáticas. La sección B contiene un potenciómetro de 100KΩ, nombrados inLVL1 e inLVL2 respectivamente, que funciona como atenuadores de la señal de entrada. A estos les sigue un capacitor de 1μF y una resistencia de 100KΩ, que conforman un filtro pasa altas de acople AC, con una frecuencia de corte de aproximadamente 2Hz para bloquear cualquier componente DC sin afectar las frecuencias audibles.

Luego se tiene un amplificador con ganancia de 2. Esto es para compensar por la pérdida que se tiene en la siguiente etapa de paneo. La parte C se encarga de enviar o "panear" la señal al canal L o R para luego ser amplificada. La forma en que esto ocurre es la siguiente. Se tienen 2 resistencias de 10KΩ conectadas a un potenciómetro de 10KΩ llamado Pan, seguido de 2 resistencias de 100KΩ cada una conectada a un amplificador operacional. Ya que la entrada positiva del amplificador

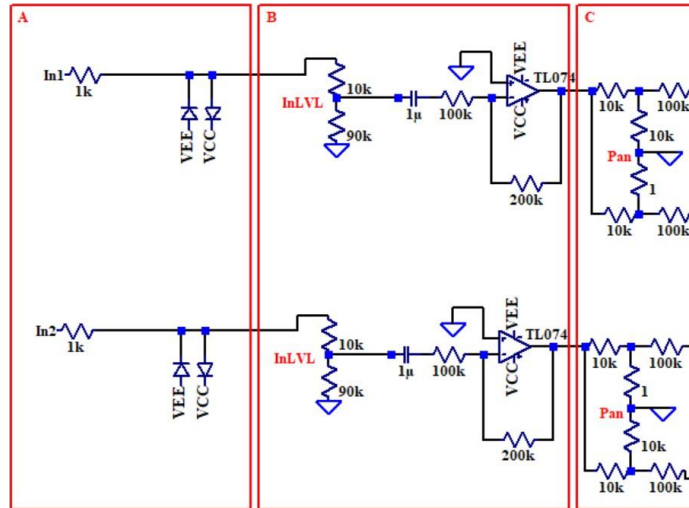


Figura 7.35: Entrada y paneo.

está conectada a tierra la entrada negativa también tiene un voltaje de 0. Esto significa que, en el potenciómetro de paneo, la resistencia de  $100\text{k}\Omega$  está en paralelo con el potenciómetro. El paneo se produce cuando la resistencia que conforman el potenciómetro y la resistencia de  $100\text{k}\Omega$  se hace muy grande, impidiendo el paso de la corriente por un lado y, ya que la resistencia en el otro canal disminuye conforme la otra aumenta, la corriente comienza a fluir por el otro lado.

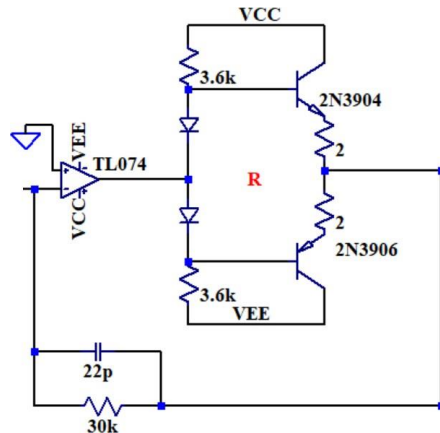


Figura 7.36: Etapa de salida.

El amplificador operacional de la Figura 7.36 se conecta a la salida de audífonos. Estos tienen distintas impedancias. Para audífonos con impedancias pequeñas, como  $10\Omega$ , la ganancia del amplificador se ve afectada debido a que el amplificador, en este caso el TL071, puede entregar hasta  $26\text{mA}$ . Se debe conseguir una impedancia lo suficientemente grande a la entrada para no afectar la ganancia. La solución es colocar un amplificador Push-Pull. Esto significa colocar dos transistores en configuración de seguidor emisor como se muestra en la figura. Ya que lo importante es que la corriente no sea consumida por una resistencia de carga baja, el transistor es la solución ideal, pues la corriente en la carga es mucho más grande que la corriente en la base. Los diodos que se encuentran entre las resistencias de  $3.6\text{k}\Omega$  sirven para mantener los transistores abiertos y no caer en zona de corte. Con este circuito se obtiene una señal sin distorsión a la salida, con una amplitud de casi  $1\text{V}$

pico. El capacitor de 22pF y la resistencia en paralelo forman un filtro pasa bajas con una frecuencia de corte de 241kHz.

## 7.5. Fuente de poder

Comúnmente, las fuentes de poder para el formato Eurorack se construyen a partir de un transformador AC. Estas fuentes consisten en un transformador que reduce la amplitud, pero mantiene la señal AC. Luego, la señal atraviesa un circuito rectificador y regulador de voltaje para tener el voltaje DC deseado a la salida. El circuito rectificador separa los picos positivos de los negativos para luego suavizar el semi ciclo mediante capacitores. Por último, un regulador de voltaje se encarga de entregar una señal estable a la salida.

La Figura 7.37 muestra el esquemático de la fuente lineal a implementar. A la entrada se tiene un voltaje AC de 12Vrms, pues ya ha sido reducida la tensión debido a la fuente AC/AC. La señal es rectificada con los diodos D1 y D4, dividiendo la señal en semi ciclos positivos y negativos, los positivos atraviesan la parte superior del circuito y los negativos la inferior. Luego de ser rectificada la señal, se filtra con capacitores electrolíticos para hacer la señal más estable. Por último, pasa por un regulador de voltaje que entrega una salida de 12V DC.

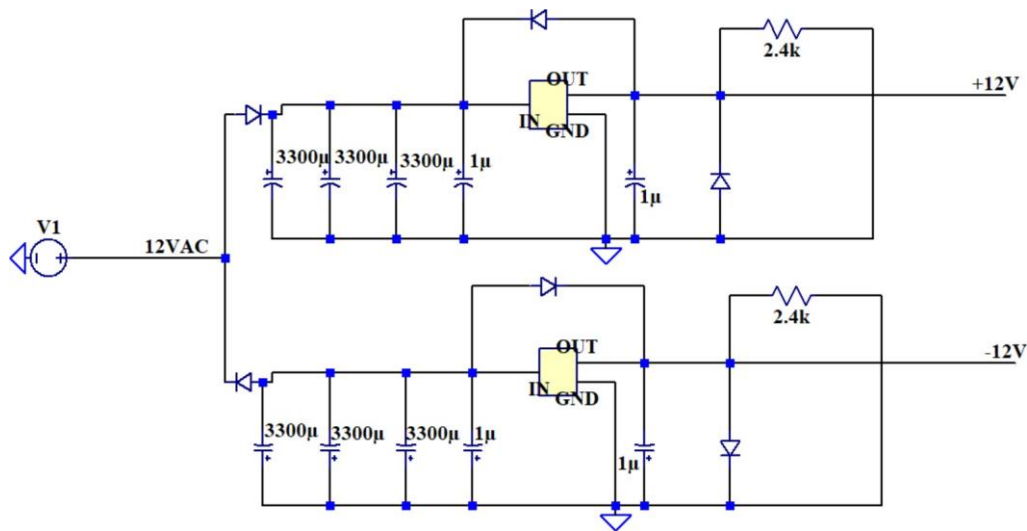


Figura 7.37: Fuente de voltaje lineal [13].

La gráfica 7.38 muestra de color verde el voltaje AC a la entrada del circuito y en color azul y rojo los voltajes positivo y negativo. Se puede observar que los rectificadores, en este caso LM7812 y LM7912 para voltajes positivos y negativos respectivamente, entregan una señal prácticamente de 12V a la salida. Las resistencias R1 y R2 fueron colocadas para poder medir el voltaje a la salida antes de conectar un módulo, Las resistencias R3 y R4 no son necesarias.

Adicional a la fuente de poder principal, cada módulo cuenta con su propio circuito encargado de recibir corriente desde la fuente principal, adecuarla y proteger al resto del circuito de ruido o de posibles cortos[11].

La Figura 7.39 muestra el circuito utilizado para conectar cada módulo del sintetizador a la fuente de poder. El recuadro rojo representa el header de 2X5 pines que se utiliza como estándar para el formato eurorack. Se conectan los pines 1 y 2 a la alimentación negativa, los pines 3 a 8 a tierra y los pines 11 y 12 a la alimentación positiva. Los diodos Schottky se aseguran que el circuito

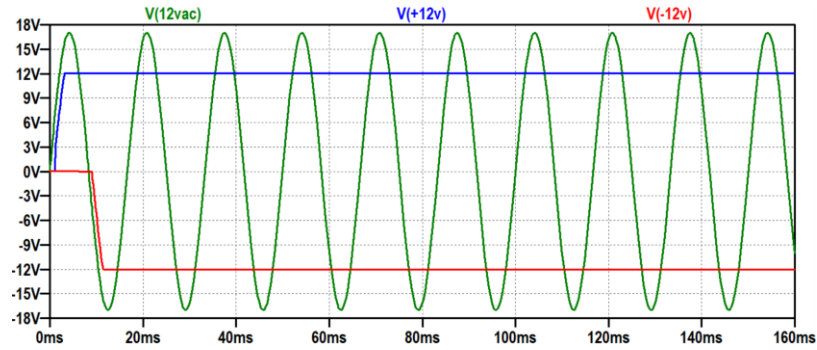


Figura 7.38: Gráfico de voltaje vs tiempo de la fuente lineal, con una entrada de voltaje AC de 12Vrms.

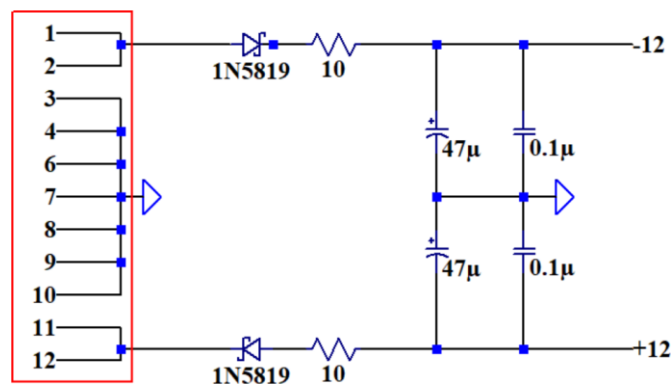


Figura 7.39: Circuito para conexión de la fuente de poder a cada módulo del sintetizador.

no se arruine si se llega a conectar incorrectamente, ya que solo conducirá corriente a través de ellos si se conecta correctamente a la fuente de poder. Los diodos Schottky tienen una baja caída de voltaje directa, por lo que son bastante eficientes en esta aplicación.

Luego, se tienen resistencias de  $10\Omega$  seguidas de capacitores cerámicos de desacople. Los capacitores electrolíticos actúan contra posibles fluctuaciones causadas por la fuente de poder, pues en caso de haber una caída de voltaje, estos compensan esa caída; lo mismo ocurre con los sobre voltajes. Estos capacitores, en conjunto con las resistencias, compensan las fluctuaciones a bajas frecuencias. Los capacitores cerámicos también filtran frecuencias de radio y frecuencias altas causadas por fuentes conmutadas. Otra ventaja de las resistencias de este circuito es que funcionan como fusibles encaso de haber un cortocircuito, evitando daños en los integrados.

---

## Discusión de resultados

---

Luego de realizar el análisis de cada módulo se continuó con la construcción de los mismos, buscando los materiales necesarios y soldando los componentes en placas perforadas. Para realizar las pruebas correspondientes se utilizó el equipo de laboratorio de la universidad, con el fin de obtener gráficas con el osciloscopio y alimentar cada módulo con una fuente de poder que no introdujera ruido.

### 8.1. VCO

El circuito del oscilador produjo una onda con forma de diente de sierra como se esperaba. La frecuencia puede ser modificada mediante CV además de los potenciómetros de afinación coarse "fine". Se produjo una señal PWM a partir de la onda con forma de diente de sierra. El ancho de pulso se pudo controlar mediante un potenciómetro y mediante CV. Los picos de la señal diente de sierra se observan redondeados. Esto puede deberse a la necesidad de filtrar algunas frecuencias para evitar picos indeseados en la señal PWM.

### 8.2. VCF

Las gráficas mostradas en la Figura 8.4 y 8.5 muestran de color amarillo la señal a la entrada y de color azul la señal a la salida. La primera gráfica muestra una señal a la salida con una amplitud menor a la de entrada. Además, la señal de salida se parece más a un senoide que a una onda cuadrada, como es el caso de la señal de entrada. Esta captura fue tomada con el filtro pasa bajas configurado de tal manera que la frecuencia de corte estuviese bastante baja. Lo que se aprecia a la salida es el efecto de filtrar una señal cuadrada hasta casi permitir únicamente el paso de su frecuencia fundamental, pues se eliminan los armónicos que conforman la onda cuadrada, redondeando cada vez más las esquinas y disminuyendo su amplitud debido a la eliminación de los armónicos.

La segunda gráfica muestra una onda que parece ser una onda cuadrada con un filtro pasa bajas

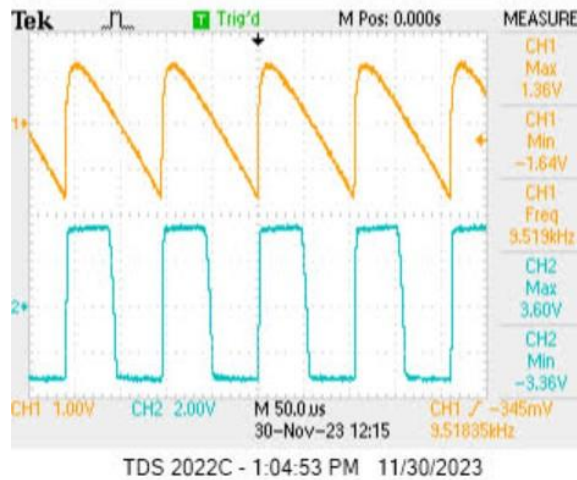


Figura 8.1: Gráfico de voltaje vs tiempo medido con osciloscopio. Onda diente de sierra(Amarillo) y señal PWM(Azul).

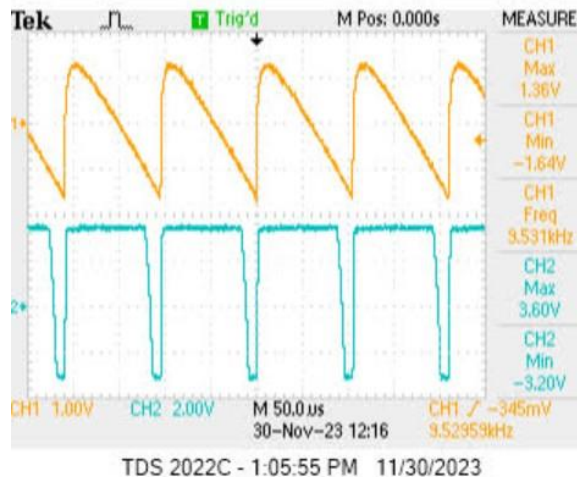


Figura 8.2: Señal PWM con ciclo de trabajo alto.

menos agresivo que la primera gráfica, pero con un pico de voltaje que ésta no tiene. El filtro fue configurado para que su frecuencia de corte se encontrase a una frecuencia más alta, por lo que puede apreciarse un poco la esquina de la señal cuadrada en la del lado derecho de la señal de salida. El filtro también se configuró para producir un nivel significativo de resonancia, que es lo que produce el pico por encima y por debajo de la onda cuadrada a la salida.

Los resultados obtenidos con el osciloscopio mostraron un módulo de filtro pasa bajas efectivo, con una frecuencia de corte que es capaz de ser controlada por voltaje, pues al entregar una onda sinusoidal en la entrada CV, la señal a la frecuencia de corte realizaba una filtración más o menos agresiva, dependiendo del voltaje de la onda CV en ese momento. Ambas entradas CV funcionan perfectamente, siendo capaces de controlar el nivel de estas mediante los potenciómetros de nivel respectivos a cada entrada.

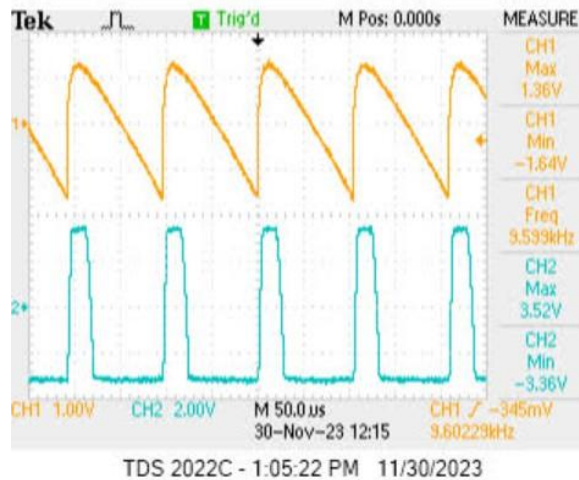


Figura 8.3: Señal PWM con ciclo de trabajo bajo.

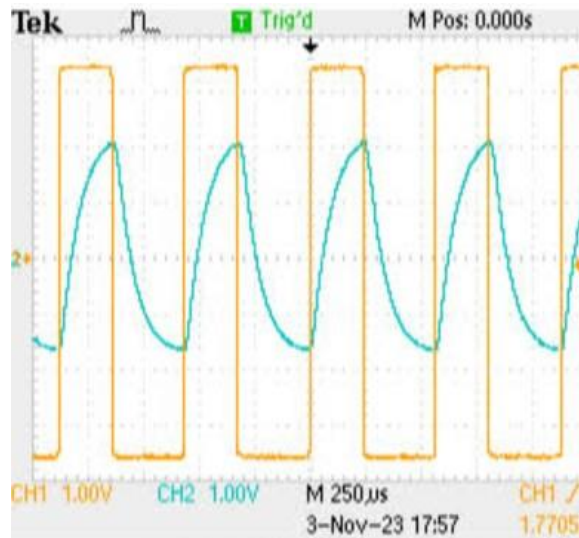


Figura 8.4: Gráfico de voltaje vs tiempo de un filtro pasa bajas. señal cuadrada a la entrada y señal suavizada a la salida.

### 8.3. Envoltente

La Gráfica 8.6 muestra la señal de Gate a la entrada y el voltaje con forma de onda triangular a la salida. La entrada del envoltente únicamente admite valores DC positivos a la salida. El propósito de este módulo es proporcionar una envoltente a la salida, con la cual se pueda manipular algún otro módulo. En este caso se aprecia el ataque y el release producido por el capacitor del circuito, controlados mediante los potenciómetros de  $1M\Omega$ .

La Figura 8.7 muestra una salida con una amplitud mayor a la de la señal de entrada. Esto se debe a que la señal de entrada fue alimentada con una onda menor a 5V, pues la onda de entrada únicamente debe ser mayor a 3V para funcionar. Sin embargo, según el estándar para sintetizadores modulares, todas las ondas de entrada y salida CV deben tener como máximo una amplitud de 0V



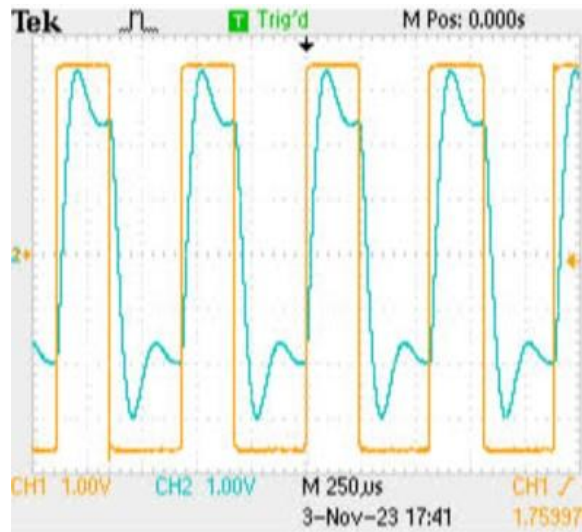


Figura 8.5: Gráfico de voltaje vs tiempo de un filtro pasa bajas. señal cuadrada a la entrada y señal suavizada con resonancia a la salida.

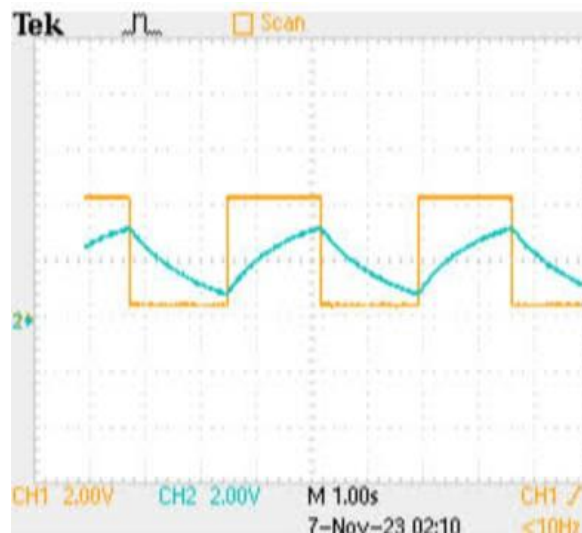


Figura 8.6: Voltaje de entrada(amarillo) y salida(azul) del módulo envolvente con configuración de Loop.

a 10VDC. La señal de salida parece estar recortada. Este efecto es causado por el sustain, que evita que el voltaje a la salida caiga mientras el voltaje a la entrada no haya caído.

El circuito tiene dos configuraciones, single y loop. Single es cuando la salida depende de la entrada, como en las gráficas anteriores. Loop no depende de la entrada, pues el circuito se retroalimenta y se dispara cuando el Schmitt trigger no percibe un voltaje en su terminal negativa. La gráfica 8.8 muestra la configuración de loop. En ella se observa que la salida se activa periódicamente. Para esta captura se configuró el envolvente para no tener ataque y tener poco release. la Figura 8.9 muestra la misma configuración que 8.8, pero con un poco de ataque y nada de release.



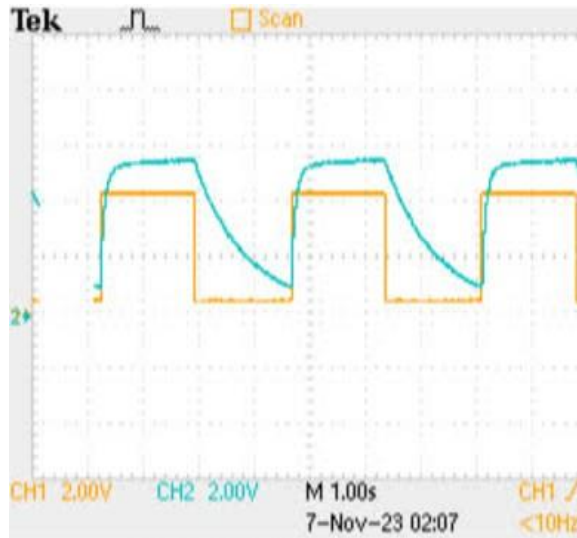


Figura 8.7: Configuración single. En esta configuración es posible agregar decay y sustain.

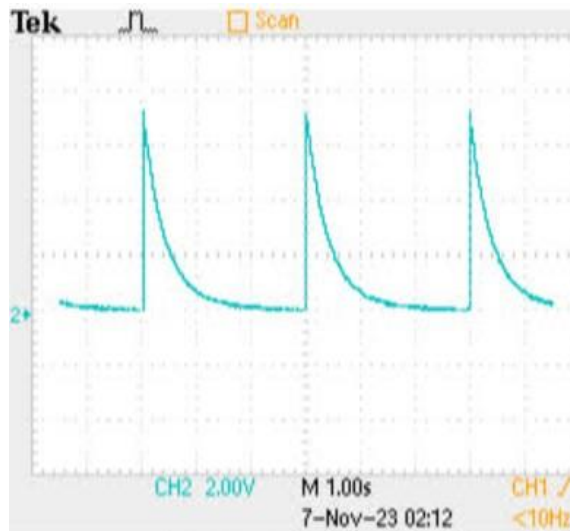


Figura 8.8: Señal sin attack.

## 8.4. Etapa de salida

Al conectar una señal sinusoidal a una entrada, se observó una gráfica como las de las figuras 8.10 y 8.11. Ambas gráficas muestran las dos salidas L y R de la señal estéreo, con el potenciómetro de paneo totalmente girado a un lado y cerca de la mitad, respectivamente.

Se conectó la salida a un par de audífonos estéreo y se comprobó que el paneo funciona y la señal es lo suficientemente grande para ser escuchada con claridad. El potenciómetro de nivel de entrada atenúa exitosamente la señal hasta que ésta deja de ser escuchada en los audífonos.

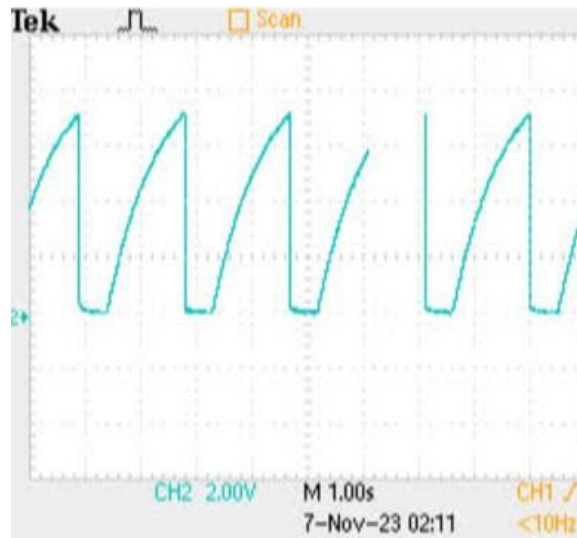


Figura 8.9: Señal sin release.

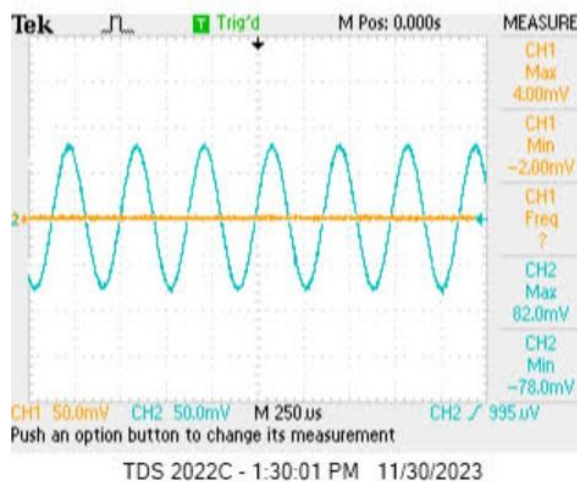


Figura 8.10: Señal totalmente paneada.

## 8.5. Fuente de poder

Se optó por instalar el transformador de la fuente lineal dentro del rack para instalar los módulos. Esta decisión fue tomada ya que se consiguió un transformador capaz de entregar una corriente mayor, con lo cual es posible conectar más módulos. Se verificó que el voltaje de este nuevo transformador, luego de ser rectificado, no sobrepasara los valores recomendados en la hoja de datos de los reguladores de voltaje. El voltaje DC entregado por el transformador es de 23.6V; la hoja de datos estipula que la diferencia entre el voltaje de salida y el de entrada no puede superar los 40V y, siendo esa diferencia  $23.6 - 12 = 11.6$ , fue seguro conectar el circuito al transformador. Se midió el voltaje de salida de la fuente y se comprobó que es capaz de entregar un voltaje de salida de 12V. Se utilizaron potenciómetros de precisión para regular el voltaje de una manera más exacta.

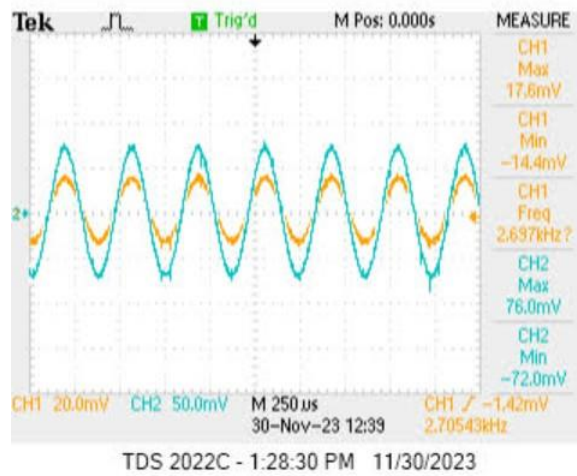


Figura 8.11: Señales de salida con poco paneo.

---

### Conclusiones

---

- Se concluye que el módulo oscilador es capaz de producir, tanto una señal con forma de diente de sierra como una señal PWM, cuyos parámetros pueden ser manipulados mediante el control por voltaje. Módulos como el envolvente podrán controlar tanto la frecuencia como el ciclo de trabajo de la señal PWM.
- De acuerdo con los resultados obtenidos en el capítulo anterior respecto al filtro pasa bajas, el módulo funciona como esperado, cortando las frecuencias bajas de acuerdo a la configuración y al control externo que esté conectado a él. Además, es posible aplicar resonancia y amplificarla a voluntad, por lo que se concluye que la escalera de diodos es un circuito efectivo tanto para filtrar señales como para controlar su frecuencia de corte con voltajes externos.
- Según la evidencia mostrada en el capítulo anterior, se concluye que el circuito envolvente es un circuito funcional, capaz de proporcionar el voltaje esperado a la salida. Esto posibilita el control por voltaje de otros módulos de una manera más musical y agradable al oído.
- La salida del módulo de salida podrá ser conectado a otros aparatos electrónicos de audio, sin riesgo de daños o distorsiones indeseadas, pues las señales de salida están debidamente adecuadas para ser conectadas a audífonos o a cualquier dispositivo que acepte un nivel de línea.
- Basado en los valores medidos durante las pruebas con multímetro, la fuente de voltaje es capaz de alimentar los distintos módulos del sintetizador, minimizando el ruido que afectaría las señales utilizadas y produciendo sonidos indeseados.
- Según las mediciones realizadas con el multímetro digital, la fuente lineal es capaz de entregar un voltaje DC de +12V y -12V exitosamente, sin ninguna variación visible, por lo que es posible concluir que la fuente lineal es una solución viable para alimentar los módulos de un sintetizador sin entregar un ruido perceptible dentro de las frecuencias audibles.

## Recomendaciones

- Se recomienda combinar los módulos construidos con otros módulos de sintetizador, como lo son el secuenciador, máquinas de ritmos, efectos, entre otros.
- Al construir una caja para alojar los módulos, se recomienda tener en cuenta el consumo de cada módulo. Si la fuente de poder no puede entregar la corriente suficiente, es posible que los módulos funcionen de formas indeseadas o que no funcionen.
- Para mayor protección contra ruidos indeseados causados por la línea de potencia, se recomienda colocar un filtro Notch en el circuito de la fuente de voltaje. Un filtro Notch un tipo de filtro que se encarga de atenuar una frecuencia o banda de frecuencias específica. La banda de frecuencias que el filtro elimina está delimitada por las dos frecuencias de corte, que son las frecuencias donde la amplitud se atenúa 3 decibelios. Las figuras 10.1, 10.2 y 10.3 muestran el esquemático del circuito pasivo Twin T Notch y sus respectivos análisis para comprobar su efectividad.

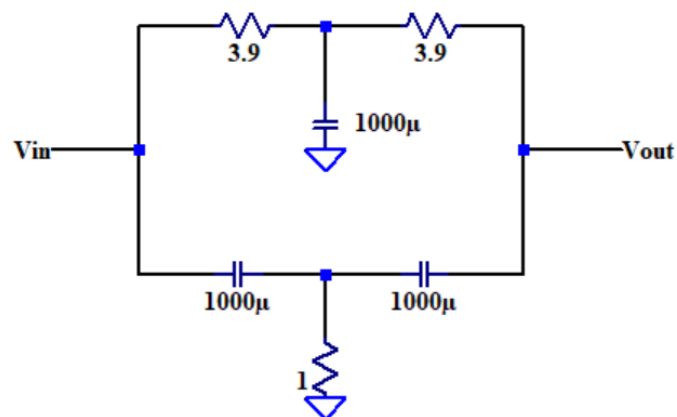


Figura 10.1: Circuito de un filtro Notch activo, calculado para atenuar 60Hz.

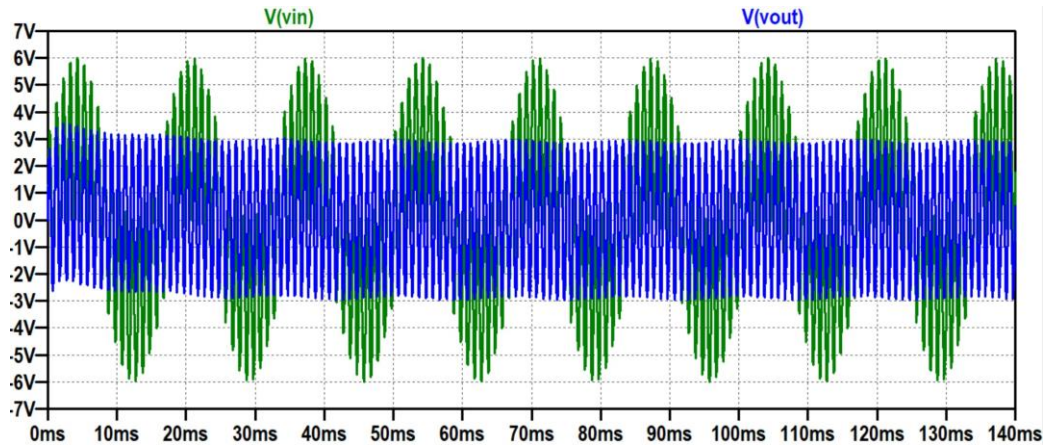


Figura 10.2: Gráfico de voltaje vs tiempo de una señal senoidal de entrada(Vin) de 1kHz, con ruido de 60Hz la señal filtrada(Vout) sin ruido.

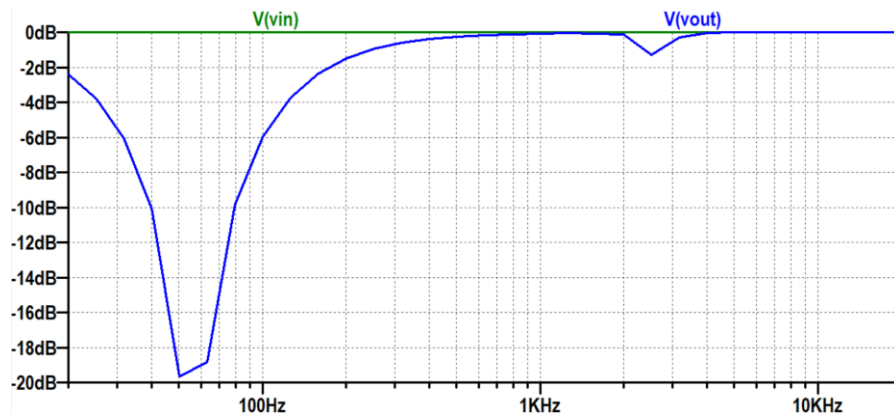


Figura 10.3: Análisis AC de la magnitud de la entrada y la salida del filtro. Se puede apreciar que el filtro notch atenúa los 60Hz aproximadamente 19 decibelios y tiene frecuencias de corte en 22Hz y 141Hz aproximadamente.

- [1] Aurelio Cadenas, Aug 2020. <https://www.youtube.com/watch?v=-z1a22UxZE4>.
- [2] Dec 2021. <https://intellijel.com/support/eurorack-101/>.
- [3] Brown, Marty: *Power supply cookbook ed. 2*. Elsevier Science, 2001.
- [4] Horowitz, Paul y Winfield Hill: *1.7 Impedance and reactance*, página 40–45. Cambridge University Press, 2022.
- [5] Klein, Moritz: *Erica synths*, Dec 2021. [https://www.ericasynts.lv/media/VCO\\_MANUAL\\_v2.pdf](https://www.ericasynts.lv/media/VCO_MANUAL_v2.pdf).
- [6] Klein, Moritz: *Erica synths*, Jun 2022. [https://www.ericasynts.lv/media/VCF\\_MANUAL\\_v2.pdf](https://www.ericasynts.lv/media/VCF_MANUAL_v2.pdf).
- [7] Musik elektronik, Doepfer: *A100 CGK manual - doepfer*, 1994. [https://doepfer.de/a100\\_man/A100\\_CGK\\_manual.pdf](https://doepfer.de/a100_man/A100_CGK_manual.pdf).
- [8] Poblet, José Mompín: *Manual del radioaficionado moderno*. Publicaciones marcombo s.a., 1984.
- [9] Robbins, Michael F.: *Ultimate Electronics*, 2021. <https://ultimateelectronicsbook.com/#op-amp-voltage-buffer>.
- [10] Skala, Matthew: *Exponential converters and how they work*, Oct 2018. <https://northcoastsynthesis.com/news/exponential-converters-and-how-they-work/>.
- [11] Synths, Erica, 2022.
- [12] Wilson, Ray: *Make: Analog synthesizers*. Maker Media, 2014.
- [13] Wilson, Raymond J.: *Wall Wart Power Supply (+/-9V to +/-15V)*, Jun 2010. [https://musicfromouterspace.com/analogsynth\\_new/WALLWARTSUPPLY/WALLWARTSUPPLY.php](https://musicfromouterspace.com/analogsynth_new/WALLWARTSUPPLY/WALLWARTSUPPLY.php).

### A.1. Construcción del filtro

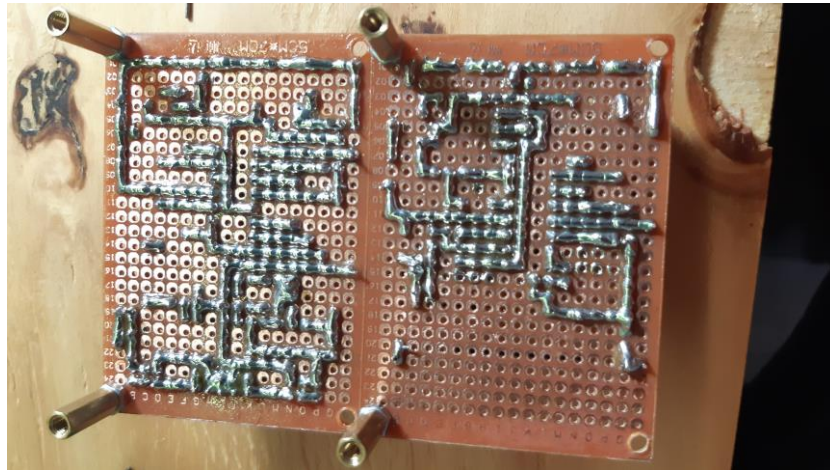


Figura A.1: Vista inferior de la placa perforada.

### A.2. Construcción del envoltorio



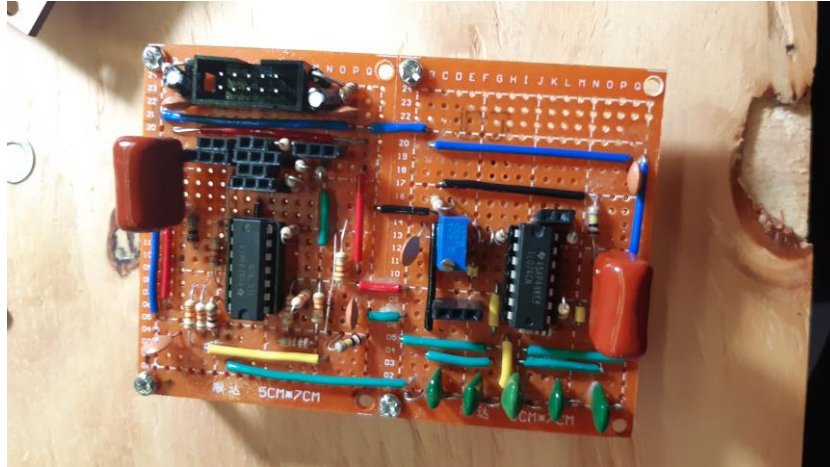


Figura A.2: Vista superior de la placa perforada.



Figura A.3: Diseño del panel frontal con entradas, salidas y potenciómetros debidamente indicados.

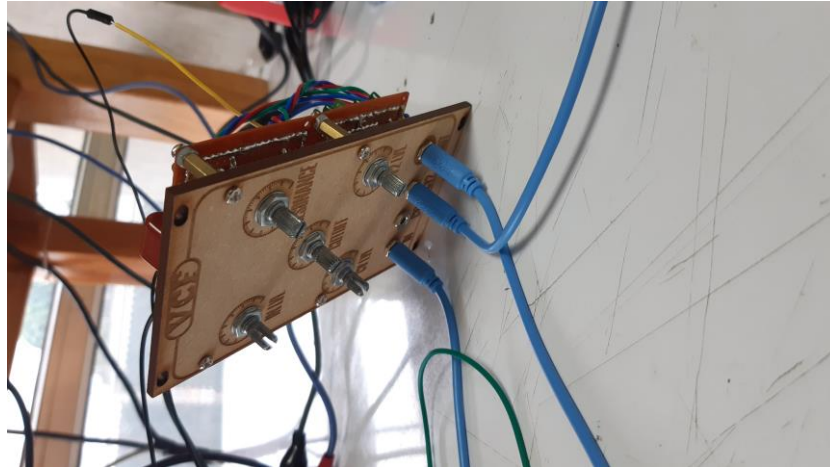


Figura A.4: Pruebas de laboratorio.

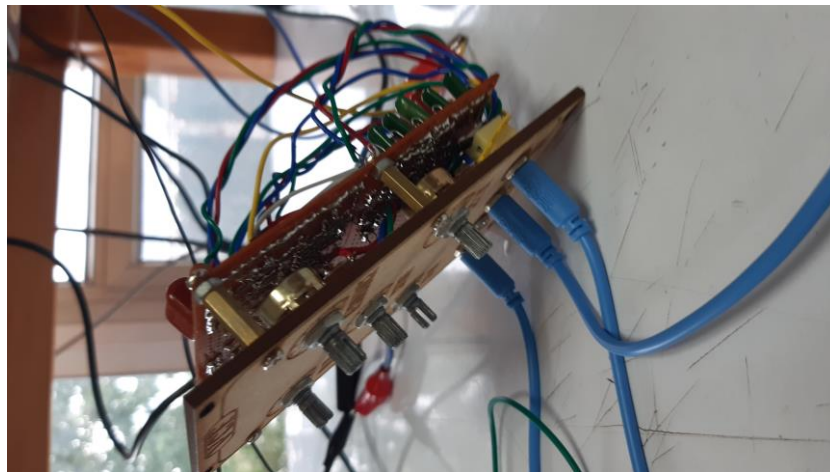


Figura A.5: Pruebas de laboratorio.

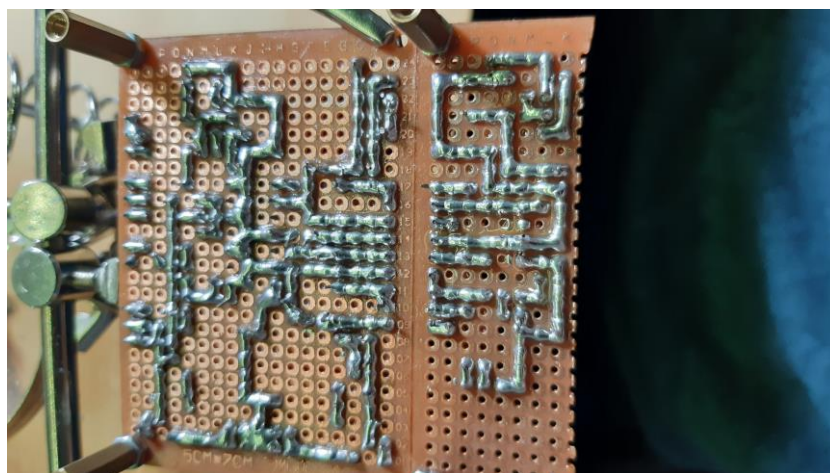


Figura A.6: Vista inferior de la placa perforada.

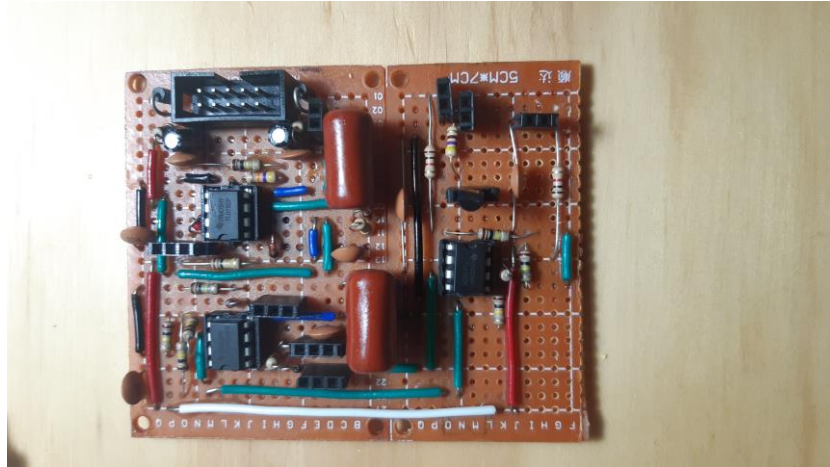


Figura A.7: Vista superior de la placa perforada.



Figura A.8: Diseño del panel frontal con entradas, salidas y potenciómetros debidamente indicados.

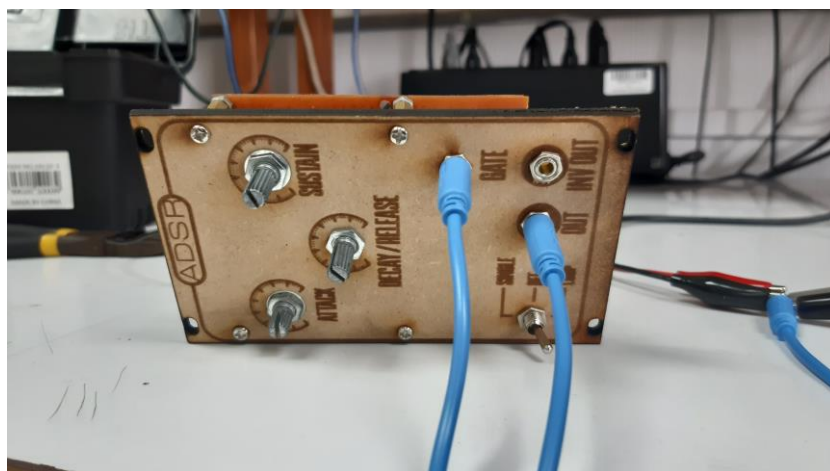


Figura A.9: Pruebas en el laboratorio.



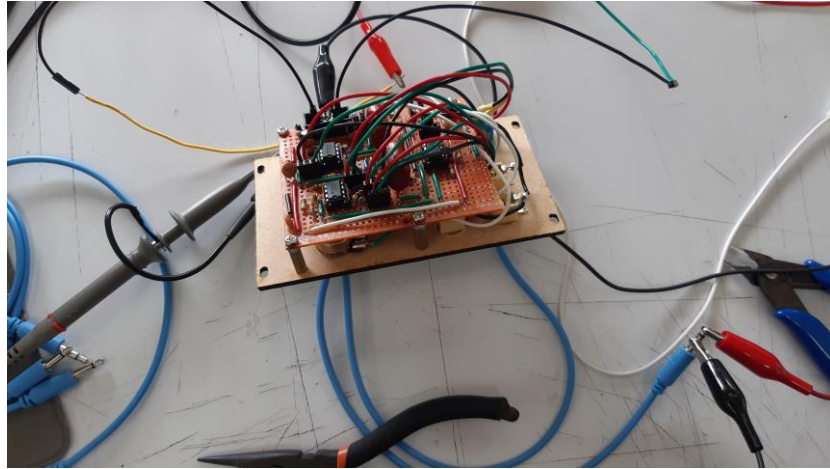


Figura A.10: Pruebas en el laboratorio.

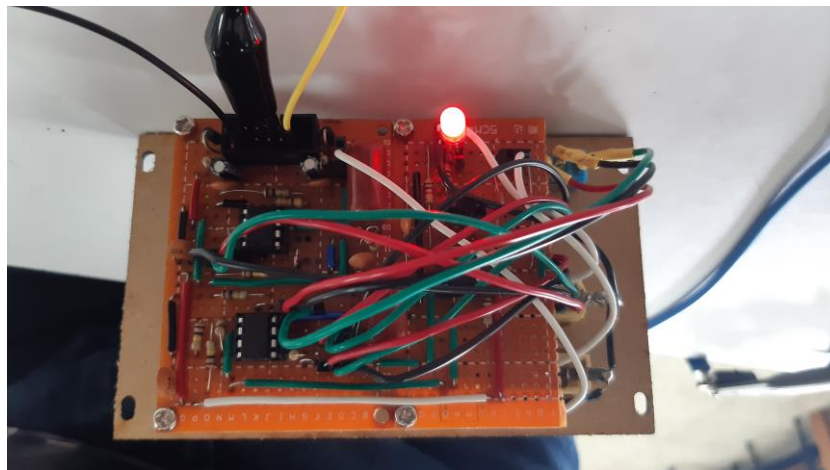


Figura A.11: Pruebas en el laboratorio.