

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA  
Facultad de Ingeniería



ANÁLISIS E IMPLEMENTACIÓN DE CIRCUITOS ANALÓGICOS PARA EL DISEÑO  
DE UN SINTETIZADOR ANALÓGICO MODULAR

Trabajo de graduación presentado por Jeremy Abraham Mejía Morales  
para optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería en Tecnología de Audio

Guatemala  
2025



UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA  
Facultad de Ingeniería




ANÁLISIS E IMPLEMENTACIÓN DE CIRCUITOS ANALÓGICOS PARA EL DISEÑO  
DE UN SINTETIZADOR ANALÓGICO MODULAR

Trabajo de graduación presentado por Jeremy Abraham Mejía Morales  
para optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería en Tecnología de Audio


Guatemala  
2025

Vo.Bo.:


(f)   
\_\_\_\_\_

Ing. Pablo Oliva

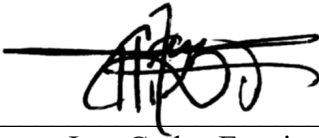
Tribunal Examinador:

(f)   
\_\_\_\_\_

Ing. Pablo Oliva

(f)   
\_\_\_\_\_

MBA. Raúl Dacaret

(f)   
\_\_\_\_\_

Ing. Carlos Esquit

Fecha de aprobación: 2 de Julio de 2025

Agradezco a Dios la oportunidad soñada de haber formado parte de La Universidad del Valle de Guatemala. A mi familia, especialmente a mis padres, quienes me brindaron un apoyo incondicional en todo este proceso; a mis tíos Osman y Eylin, por abrirme las puertas de su casa durante los primeros tres años; y a mis tíos Ivo y Erika, por hacerlo durante los últimos tres años. Agradezco y valoro mucho el esfuerzo realizado. Gracias por creer en mí incluso en los momentos más difíciles.

A mi asesor de Tesis Pablo Oliva, gracias por compartir de su conocimiento y valiosos consejos académicos. Su acompañamiento fue fundamental para lograr este trabajo.

A los catedráticos que me impartieron los cursos a lo largo de la carrera, gracias por la motivación y el ánimo que inspiraban para continuar aprendiendo y desarrollándome. Gracias Merlín Espina, por los consejos y oportunidades dentro de las actividades extracurriculares, que me permitieron desarrollar mis habilidades profesionales.

A mis amigos y compañeros de carrera, por el ánimo constante para seguir adelante y por la oportunidad de construir un vínculo de familia muy fuerte, donde con confianza podía contar con ellos para lo que fuera.

A todos aquellos que formaron parte del proceso y aportaron para este logro, muchas gracias.

<i>Agradecimientos</i> .....	<i>v</i>
<i>Listado de cuadros</i> .....	<i>viii</i>
<i>Listado de figuras</i> .....	<i>ix</i>
<i>Resumen</i> .....	<i>xi</i>
<i>Abstract</i> .....	<i>xii</i>
<b>1. Introducción</b> .....	<b>1</b>
<b>2. Objetivos</b> .....	<b>2</b>
<b>2.1. Objetivo general</b> .....	<b>2</b>
<b>2.2. Objetivos específicos</b> .....	<b>2</b>
<b>3. Alcance</b> .....	<b>3</b>
<b>4. Justificación</b> .....	<b>4</b>
<b>5. Marco teórico</b> .....	<b>5</b>
<b>5.1. Sintetizadores</b> .....	<b>5</b>
5.1.1. Sintetizador analógico .....	7
5.1.2. Sintetizador digital .....	8
5.1.3. Síntesis .....	8
5.1.4. Síntesis aditiva .....	9
5.1.5. Síntesis sustractiva .....	9
5.1.6. Síntesis por modulación .....	10
5.1.7. Síntesis granular .....	11
<b>5.2. Osciladores</b> .....	<b>11</b>
5.2.1. VCO .....	12
5.2.2. LFO .....	13
5.2.3. VCF .....	13
5.2.4. VCA .....	13
5.2.5. ADSR .....	14
5.2.6. Ruido .....	14
<b>5.3. Comunicación MIDI</b> .....	<b>16</b>
5.3.1. Historia .....	17
5.3.2. Hardware .....	17
5.3.2.1. Controladores .....	17
5.3.2.2. Generadores de sonido .....	18
5.3.3. Conexiones .....	18
5.3.4. Cables y conectores .....	18
<b>6. Metodología</b> .....	<b>20</b>
<b>6.1. Oscilador controlado por voltaje (VCO)</b> .....	<b>20</b>
<b>6.2. Oscilador de baja frecuencia (LFO)</b> .....	<b>27</b>

<b>6.3. Mixer</b> .....	<b>29</b>
<b>6.4. Noise</b> .....	<b>31</b>
<b>6.5. DAW</b> .....	<b>35</b>
6.5.1. Librerías .....	35
6.5.2. Variables globales del programa .....	36
6.5.3. Funciones del programa .....	37
<b>7. Resultados</b> .....	<b>39</b>
7.1. VCO .....	39
7.2. LFO.....	40
7.3. Mixer.....	43
7.4. Noise.....	44
7.5. DAW .....	46
<b>8. Conclusiones</b> .....	<b>47</b>
<b>9. Recomendaciones</b> .....	<b>48</b>
<b>10. Bibliografía</b> .....	<b>49</b>
<b>11. Anexo</b> .....	<b>50</b>

---

Listado de cuadros

---

Cuadro 1. Voltaje de cada semitono ..... 13

Figura 1. Telharmonium .....	5
Figura 2. Órgano eléctrico .....	6
Figura 3. Theremin .....	6
Figura 4. Sintetizador analógico .....	7
Figura 5. Mini Moog .....	7
Figura 6. Primer sintetizador analógico.....	7
Figura 7. IBM 704 .....	8
Figura 8. Synclavier.....	8
Figura 9. Síntesis aditiva .....	9
Figura 10. Síntesis sustractiva .....	10
Figura 11. Modulaci3n de frecuencia .....	10
Figura 12. Modulaci3n de amplitud .....	10
Figura 13. Síntesis granular .....	11
Figura 14. Tipos de ondas en osciladores .....	12
Figura 15. ADSR .....	14
Figura 16. Ruido blanco .....	15
Figura 17. Onda sinusoidal.....	15
Figura 18. Ejemplo de ruido y tono puro en el tiempo.....	16
Figura 19. Controlador MIDI .....	18
Figura 20. Comunicaci3n MIDI por bits .....	18
Figura 21. Conectores MIDI.....	19
Figura 22. Oscilador de onda triangular y cuadrada.....	21
Figura 23. Oscilador controlado por voltaje.....	22
Figura 24. Conversi3n exponencial con un transistor .....	23
Figura 25. Enfrentamiento de transistores.....	24
Figura 26. Exponenciador con transistores.....	25
Figura 27. Dise2o del exponenciador .....	26
Figura 28. Conversi3n de onda triangular a onda sinusoidal .....	26
Figura 29. Diagrama de bloques VCO .....	27
Figura 30. Carga y descarga del capacitor.....	27
Figura 31. LFO de onda variable.....	28
Figura 32. Diagrama de bloques LFO .....	29
Figura 33. Entrada del mixer .....	29
Figura 34. Etapa de salida del mixer .....	30
Figura 35. Diagrama de bloques mixer .....	31
Figura 36. Circuito ruido blanco.....	32
Figura 37. Ruido blanco .....	32
Figura 38. Shelf filter.....	33
Figura 39. Ruido blanco a ruido rosa .....	33
Figura 40. Ruido rosa .....	33
Figura 41. Ruido blanco a ruido azul .....	34
Figura 42. Ruido azul .....	34

Figura 43. Diagrama de bloques noise .....	35
Figura 44. VCO circuito final.....	39
Figura 45. VCO onda sinusoidal simulación.....	40
Figura 46. VCO onda cuadrada simulación.....	40
Figura 47. LFO circuito final.....	41
Figura 48. LFO onda triangular simulación .....	41
Figura 49. LFO onda cuadrada simulación .....	41
Figura 50. LFO onda triangular física .....	42
Figura 51. LFO onda cuadrada física .....	42
Figura 52. Circuito del mixer .....	43
Figura 53. Simulación del mixer .....	43
Figura 54. Salida física del mixer.....	44
Figura 55. Circuito noise .....	44
Figura 56. Simulación de noise .....	45
Figura 57. Simulación ondas separadas.....	45
Figura 58. Interfaz del DAW .....	46
Figura 59. Panel frontal VCO.....	50
Figura 60. Panel trasero VCO.....	50
Figura 61. Panel frontal mixer.....	51
Figura 62. Panel trasero mixer.....	51
Figura 63. Panel frontal LFO.....	52
Figura 64. Panel trasero LFO .....	52
Figura 65. Panel frontal noise.....	53
Figura 66. Panel trasero noise.....	53

El objetivo del proyecto es realizar un sintetizador analógico modular que cuente con una parte analógica y una parte digital. Al momento de ser un sintetizador modular, tendremos distintos módulos y el usuario determinará por donde habrá flujo de señal. La parte analógica es la encargada de generar las señales de audio por medio de osciladores, junto a los osciladores habrá un mixer para determinar que señales de ondas deseamos dentro del sintetizador. Otro módulo importante es el LFO (Low Frequency Oscillator), que funciona como oscilador secundario para modular la señal de audio, tendremos la opción de un ADSR para modificar los parámetros de la señal analógica como lo son el Attack, Decay, Sustain y Release, así también un VCF como filtro controlado por voltaje, generación de ruido blanco y un mixer encargado de sumar todas las señales de salida generadas por los distintos módulos del sintetizador.

La parte digital será la encargada de grabar, aplicar efectos, reproducir la grabación de audio, exportar archivos de audio y todo esto estará dentro de una interfaz gráfica con la intención de parecerse a un DAW (Digital Audio Workstation). Adicionalmente a esto, el sintetizador contará con comunicación MIDI con la intención de poder agregar un controlador MIDI externo y modificar así algunos parámetros del sintetizador, así como modificar parámetros dentro del DAW.

Dentro del sintetizador también se contará con una etapa de amplificación. La etapa de amplificación será la encargada de enviar la salida del sintetizador a una interfaz de audio para poder ser enviada a altavoces activos y así poder escuchar la señal de audio producida por el sintetizador.

The main objective was to make a modular analog synthesizer. To create this instrument, it was necessary to do research on the commercial circuits of synthesizers, analyze them and implement them. The real challenge within this project was to find the ability to interconnect the modules with each other. Being a modular synthesizer, the signal flow is determined by the user and is open to being able to make the connections we want. This allows the possibility of creating new sounds.

Since electronic music has existed, musicians have used synthesizers in their musical productions and although technology has advanced and they could have digital instruments, analog instruments continue to be used due to the characteristic sounds that can be generated. The results obtained in this project have allowed us to understand the use of synthesis and provide new designs within the music industry.

Los sintetizadores son instrumentos musicales que crean sonidos a partir de componentes electrónicos. Estos instrumentos han sido parte de la evolución musical, donde la posibilidad de crear nuevos sonidos es infinita y los músicos pueden experimentar los distintos sonidos generados por los sintetizadores, permitiendo así plasmar sus ideas de manera creativa y original. Los sintetizadores pueden ser analógicos o digitales, la mayor diferencia es que un sintetizador digital puede almacenar en un espacio de memoria dichos sonidos, mientras que uno analógico no es capaz de guardar los sonidos generados, sin embargo, es mucho más original para el usuario, ya que los sonidos generados provienen directamente de procesos totalmente analógicos, lo cual hace que el sonido sea característico y único.

Para la realización de este trabajo, nos enfocaremos en los sintetizadores analógicos. Los sintetizadores analógicos han evolucionado desde el año 1960, Moog se encargó de unir las distintas ideas para la creación de sonido por medio de componentes analógicos, y es así como los sintetizadores analógicos se formaron, pero surgió la parte modular dentro de estos sintetizadores. El sintetizador modular permite que el usuario realice las conexiones en el orden que desee, donde el flujo de la señal puede conducirse y modificar parámetros de distintos módulos como el usuario lo determine.

El objetivo es conocer los distintos sintetizadores analógicos modulares existentes, poder estudiar y analizar sus circuitos eléctricos para realizar la construcción de los módulos, y así generar sonido a partir de la interconexión entre ellos, en donde el usuario determinará el flujo de la señal. Así mismo tendremos la opción de guardar los sonidos generados por medio de un programa capaz de realizar la grabación y modificación de parámetros permitiendo la aplicación de efectos de sonido.

Otro de los retos es permitir la comunicación entre un controlador MIDI y el sintetizador, esta opción permite controlar los osciladores y notar el cambio de las oscilaciones mediante las teclas del controlador, que son la representación de las notas musicales.

Este trabajo contiene información del origen, desarrollo y comercialización de los sintetizadores, cómo ha sido la influencia de estos instrumentos en la industria musical, las partes que conforman un sintetizador, el tipo de conexiones que podemos hacer, qué resultados podemos obtener al hacer uso de un sintetizador modular, descripción de los tipos de síntesis que existen y como es aplicada.

### **2.1. Objetivo general**

Construir un sintetizador analógico modular con comunicación MIDI junto con un DAW para la grabación, modificación y exportación de audio.

### **2.2. Objetivos específicos**

- Analizar circuitos eléctricos de sintetizadores comerciales e implementación de los mismos en un sintetizador analógico modular.
- Construir módulos que logren transferir la señal sin distorsión o pérdidas de la salida, a la entrada de otro módulo.
- Establecer comunicación MIDI del sintetizador analógico modular al controlador MIDI, para la modificación de parámetros.

Este trabajo se enfoca en el análisis de circuitos de los sintetizadores analógicos modulares comerciales. El mayor reto fue realizar la construcción de los módulos y permitir la interconexión entre ellos, lograr la comunicación MIDI por medio de un controlador y enviar la información al sintetizador de manera que lo pudiera descifrar.

El Oscilador Controlado por Voltaje (VCO) que fue analizado permite generar una onda sinusoidal a partir de la creación de una onda triangular, generada por medio de un Schmitt trigger. Así también es generada una onda cuadrada, en donde el comportamiento del capacitor es de mucha importancia, ya que envía la señal al Schmitt trigger y este determina su estado de ON & OFF, permitiendo generar pulsos de estado alto o bajo.

El Oscilador de Baja Frecuencia (LFO) tiene un rango de frecuencia de 10Hz a 100Hz, aunque los sintetizadores Moog pueden llegar a oscilar entre 0.2Hz y 20Hz, la construcción del LFO determina un rango de frecuencia adecuado.

El Mixer es capaz de recibir 3 entradas, las cuales pueden ser amplificadas y atenuadas por completo gracias a su configuración inversora a la entrada. Podemos modificar la amplitud de cada señal de entrada y a su vez la amplitud de las 3 señales sumadas, esto permite que el usuario determine cuánto desea escuchar de cada señal y la sonoridad final de la sumatoria.

El módulo Noise cumple con la función de producir ruido blanco, rosa y azul. Dentro de los sintetizadores análogos, la generación del ruido se da gracias al aprovechamiento de los fenómenos de naturaleza térmica de las resistencias, donde la cantidad de ruido es determinada por el valor de la resistencia eléctrica.

El sintetizador es un instrumento musical que innovó la música moderna. Desde su creación ha sido un dispositivo experimental, incorporado en la música popular, generando un impacto a lo largo de los años, mostrando una variedad de posibilidades para apreciar y entender la música. Según la Real Academia Española [RAE] el *Sintetizador* se define como: “Instrumento musical electrónico capaz de producir sonidos de cualquier frecuencia e intensidad y combinarlos con armónicos, proporcionando así sonidos de cualquier instrumento conocido, o efectos sonoros que no corresponden a ningún instrumento convencional”. En esta definición es explicado que el sintetizador es capaz de generar sonidos conocidos, sin necesariamente tener los instrumentos que lo producen, así como generar sonidos que no provienen de instrumentos acústicos.

El sintetizador fue inventado por el músico y científico **Robert Moog** en la década de 1960, quien presentó el primer *Sintetizador modular*. Este sintetizador es capaz de crear sonidos a partir de la modificación de parámetros en módulos electrónicos y fue uno de los primeros sintetizadores comerciales que se popularizó muy rápidamente ya que permitía a los músicos crear sonidos a partir de señales eléctricas, a diferencia de tener una guitarra y producir sonidos a partir de la vibración de las cuerdas. Esto abrió un mundo de posibilidades para la creación de nuevos sonidos.

El sintetizador fue creado con el propósito de generar nuevos sonidos que no provinieran de instrumentos acústicos. Según la RAE, la Síntesis se define como: “Composición de un todo por la reunión de sus partes”. En esta definición “todo” hace referencia al sonido, en donde un sintetizador, por la unión de sus partes produce un sonido. La RAE proporciona otra definición de Síntesis, “Proceso de obtención de un compuesto a partir de sustancias más sencillas”. Un sintetizador *sintetiza* ondas complejas a partir de ondas simples.

## 5.1. Sintetizadores

Los sintetizadores son instrumentos musicales que sintetizan sonidos de una fuente electrónica. A lo largo de los años se han realizado muchos inventos desde instrumentos totalmente electrónicos, instrumentos híbridos e instrumentos digitales. El objetivo de estos instrumentos es el mismo, manipular y amplificar sonidos.

La música generada por componentes electrónicos empieza con el trabajo realizado por *Hermann Ludwing Ferdinand von Helmholtz*, físico y matemático alemán. Helmholtz construyó un instrumento electrónico con el objetivo de analizar las posibles combinaciones de los tonos y lo nombró “Resonador de Helmholtz”, aunque no tenía intereses musicales, este instrumento es considerado como un ancestro de la música electrónica.

El primer registro de instrumentos creados para la generación de sonido por medios electrónicos se dio en el año 1987 por *Thaddeus Cahill*, en donde construyó y diseñó el *Telharmonium*. Este instrumento era polifónico y de gran envergadura, en donde los sonidos eran producidos por medio de alternadores que giraban gracias a unos motores, los cuales generaban un tono puro de cada frecuencia. Para generar un sonido era necesario sumar todas las ondas, pero el ruido de los motores era demasiado fuerte, por tal razón era necesario colocar los motores en un edificio aparte. El *Telharmonium* fue el primer instrumento en retransmisión musical y fue presentado al público en el año 1906 en Holyoke, Massachusetts. El sonido generado por este instrumento se podía apreciar por medio de los cuernos acústicos del piano y los últimos modelos fueron conectados a la red de teléfono. En esta época el *Telharmonium* suministraba 1 amperio a cada receptor de teléfono, lo cual permitía que se escuchara la música sin necesariamente tener el teléfono al oído, lo cual era una dificultad ya que interrumpía cualquier otra señal en la línea.

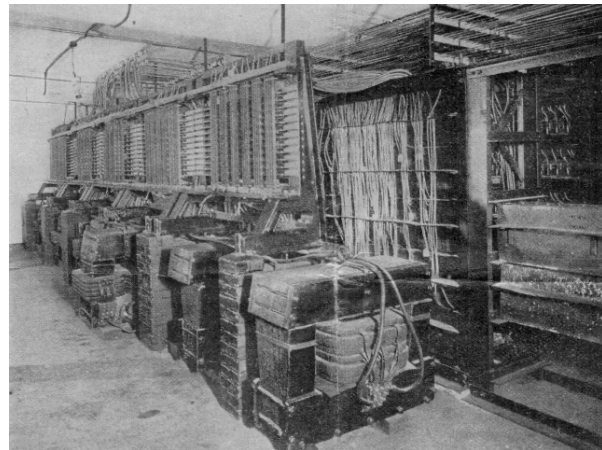


Figura 1. *Telharmonium*



Figura 2. Órgano eléctrico

El siguiente registro es el *Órgano eléctrico de Choralcello*, este instrumento era eléctrico y electro-acústico. Fue diseñado por *Melvin Severy* y *George B. Sinclair*, quienes le dieron el enfoque como un órgano casero, el cual había sido inspirado por el Telharmonium, ya que utilizaba el mismo sistema para generar los sonidos. Este instrumento contaba con dos teclados, el superior que se denominaba el piano, tenía 64 llaves y el teclado inferior con 88 llaves denominado piano y órgano. Los sonidos eran controlados gracias a las ruedas de tono y secuencias del piano que generaban vibraciones por medio de los electroimanes y sistemas de martillo.

Al pasar los años, varios científicos, ingenieros, matemáticos y físicos descubrieron que la energía eléctrica podría generar sonidos audibles, esto dio origen a un sistema de amplificación para el Telharmonium, en donde *Guillermo Duddell* descubrió que ya no era necesario utilizar el sistema telefónico para amplificar el sonido del instrumento, *Elisha Gray* descubrió que podía controlar los sonidos generados por un circuito electromagnético con un teclado y fue así como inventó el telégrafo musical que producía sonido gracias a los osciladores de un solo tono. *Lee De Forest* patentó el primer tubo de vacío, en un principio era utilizado en la tecnología de la radio, pero al pasar los años, se dio cuenta que se podían generar sonidos audibles gracias al proceso heterodyning, en donde dos ondas acústicas de alta frecuencia que varían se combinan y crean una frecuencia audible más baja, gracias a este descubrimiento Forest creó el *Audiófono piano*, el cual fue el primer instrumento de tubo de vacío.

En 1917 *Lev Sergeivitch* inventó el *Theremin* el cual era un instrumento que sin necesidad de colocar las manos sobre el instrumento generaba sonido. Contaba con dos antenas metálicas; la vertical controlaba el tono y la horizontal controlaba el volumen. Este instrumento 100% electrónico, fue uno de los primeros más famosos y de consumo masivo. *Maurice Martenot* inventó el *Ondes-Martenot* en el año 1928, este instrumento contaba con el mismo principio que el Theremin, con la diferencia que este tenía un piano incluido y permitía obtener melodías y realizar cambios de tonos. El Theremin es utilizado en la actualidad en composiciones de bandas sonoras y música pop, mientras que *Ondes-Martenot* es definido como un instrumento orquestal.



Figura 3. Theremin

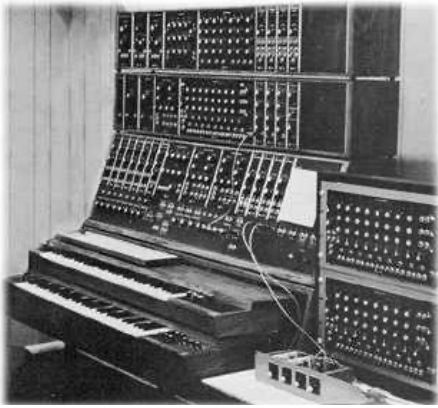


Figura 4. Sintetizador analógico

Es así como Moog crea el primer sintetizador y lo nombró “Mini Moog”, este sintetizador era modular, lo cual permitía generar diferentes sonidos por medio de técnica aditiva, sustractiva y FM. Gracias a la invención del transistor, el instrumento no necesitaba de mucho espacio y es así como el sintetizador fue incorporado al mundo musical. En la actualidad los sintetizadores Moog siguen perfeccionando y fabricando nuevos diseños, además ya contamos con opciones de sintetizadores digitales lo cual abre un mundo de posibilidades para los usuarios.



Figura 5. Mini Moog

### 5.1.1. Sintetizador analógico

El *Sintetizador analógico* es un instrumento musical conformado por circuitos eléctricos. Los sintetizadores generan una onda de sonido y puede ser modificada en su duración, altura y timbre por medio de módulos tales como amplificadores, mezcladores, filtros y moduladores de frecuencia.

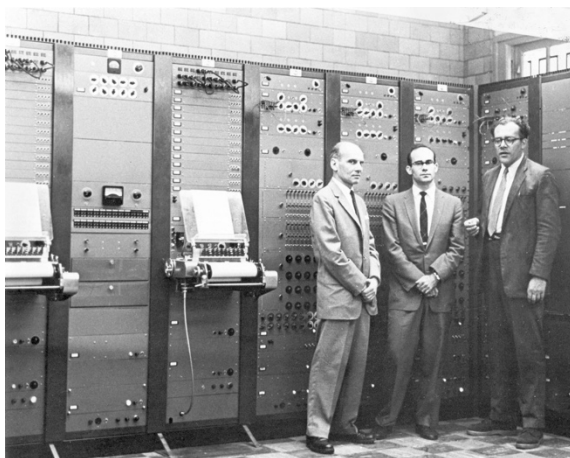


Figura 6. Primer sintetizador analógico

El primer sintetizador analógico fue desarrollado en el año 1955 por Oslen y Belar en Radio Corporation of America (RCA) en Princeton. El objetivo de este sintetizador era investigar las propiedades del sonido, donde no se tenía la intención de que fuera un instrumento musical. Al ver las posibilidades de crear nuevos sonidos, varios compositores se interesaron en el sintetizador para producir sonidos y controlar los distintos aspectos de la música. Algunos de los compositores interesados fueron Milton Babbitt, Mario

David, Morton Subotnik y Charles Wuorinen. Es así como Robert Moog desarrolla el primer prototipo.

### 5.1.2. Sintetizador digital

El *Sintetizador digital* es un instrumento con la capacidad de polifonía variable, espacio de memoria y capacidad de generar sonidos completamente digitales. En un principio el número de voces que podían ser generados dependían de los sintetizadores monofónicos integrados, ahora la polifonía depende de la capacidad de los ordenadores.

El primer programa en emular generación de sonido por medio de un ordenador fue Music I, creado en 1957 por Max Mathew quien era un programador estadounidense. El programa era ejecutado en un ordenador central universitario conocido como IBM 704. La ventaja del programa era que podía generar una onda triangular, pero no en tiempo real ya que no contaba con tanta capacidad de memoria para poder lograrlo. Es por la falta de capacidad para poder funcionar en tiempo real que las tecnologías digitales en un principio eran utilizadas solamente para funciones de control y almacenamiento en sintetizadores digitales.



Figura 7. IBM 704

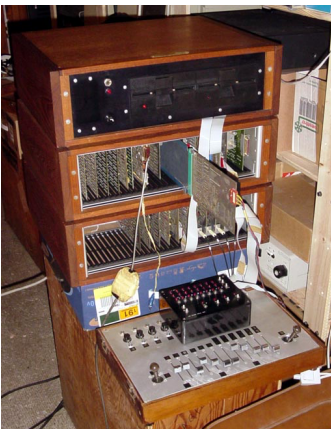


Figura 8. Synclavier

El primer sintetizador que permitía la generación de sonido completamente digital fue el Synclavier. Este instrumento salió al mercado por New England Digital Corporation (NED) en 1976. Este sintetizador utilizaba procesadores especializados con un precio muy alto, que en esa época muy pocos podían tener uno.

### 5.1.3. Síntesis

La síntesis dentro del mundo del audio podemos definirla como un proceso utilizado para obtener sonidos por medios no acústicos, como lo pueden ser procesos analógicos al generar variación de voltaje o por medio de procesamiento digital de una señal muestreada. Existen diferentes tipos de síntesis dentro de un sintetizador y se clasifican de la siguiente manera:

#### 5.1.4. Síntesis aditiva

Este tipo de síntesis consiste en la superposición de ondas simples para generar ondas complejas y se fundamenta en el teorema de Fourier, donde hace mención que una curva está compuesta por la suma de señales simples periódicas.

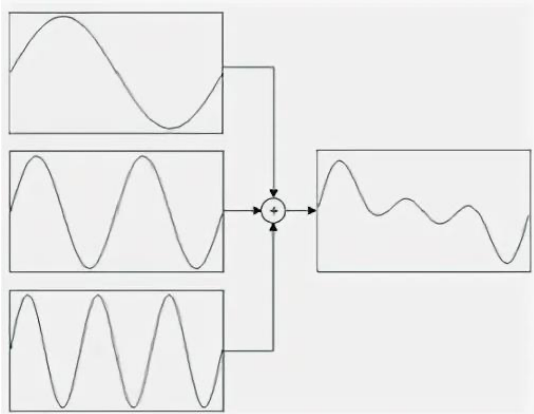


Figura 9. Síntesis aditiva

Una señal simple periódica es el tono puro, ya que oscila a una sola frecuencia, como lo es una onda sinusoidal. Cuando sumamos varias señales simples, con distinta frecuencia generaremos ondas complejas, en donde tendremos una frecuencia fundamental y las demás frecuencias serán múltiplos de la fundamental, conocidos como *armónicos*.

#### 5.1.5. Síntesis sustractiva

Este tipo de síntesis es obtenido cuando se filtra una señal compleja. La señal compleja puede ser generada desde un oscilador y al momento de filtrarla su contenido armónico es modificado, ya sea que atenuemos o aumentemos determinadas partes del contenido de su espectro.

Las señales utilizadas en este tipo de síntesis tienen varios armónicos, en este caso no podemos hacer uso de una onda sinusoidal porque su espectro es muy pobre. Es común ver ondas triangulares, cuadradas, diente de sierra o pulso, ya que estas formas de onda tienen un espectro más amplio, lo cual permite que al momento de utilizar el filtro se generen sonidos diferentes.

Los filtros producen cambios en la señal y son determinados por su función de transferencia y su orden. La función de transferencia describe la relación entre la señal de entrada y la señal de salida, donde la amplitud de la señal es atenuada en función de la frecuencia. El orden del filtro determina la atenuación de la salida a partir de la frecuencia de corte.

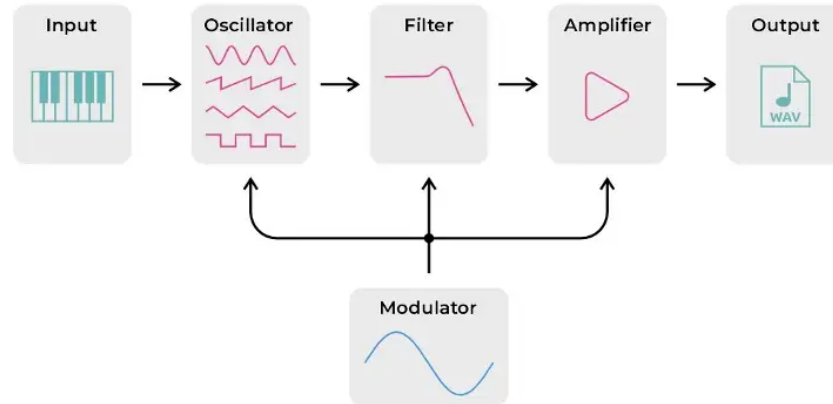


Figura 10. Síntesis sustractiva

### 5.1.6. Síntesis por modulación

Consiste en modificar el parámetro de una onda (potadora) en función de otra onda (moduladora) para producir espectros complejos. Existen dos tipos de modulaciones:

Modulación de frecuencia (FM): En este caso es la frecuencia de la onda portadora quien varía y produce nuevos armónicos conocidos como bandas laterales. Si nuestro modulador es un múltiplo entero de la onda portadora, las bandas laterales producidas serán armónicos, pero si nuestro modulador es un múltiplo no entero de la onda portadora, las bandas laterales producidas serán inarmónicos, lo cual serían sonidos inarmónicos.



Figura 11. Modulación de frecuencia

Modulación de amplitud (AM): En este caso la amplitud de la onda portadora es quien varía y su frecuencia se mantiene igual. Al momento de realizar la modulación las bandas laterales generadas estarán en función de una misma frecuencia, que en este caso sería la frecuencia de la onda portadora y aparecerán a una distancia del múltiplo de la frecuencia moduladora.

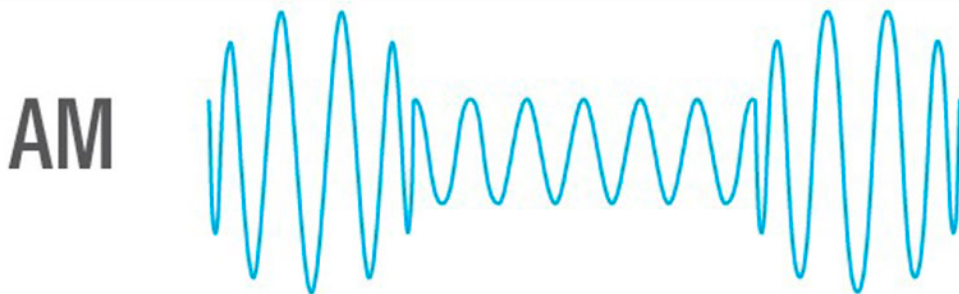


Figura 12. Modulación de amplitud

### 5.1.7. Síntesis granular

Consiste en dividir un sonido en pequeñas partes de sonido, con muy poca duración. El objetivo es modificar cada división del sonido alterando cualquiera de sus parámetros de manera independiente. Las pequeñas divisiones de sonido también pueden ser combinados con granos de otros sonidos y así es cambiada su duración, amplitud, superposición, la envolvente y la amplitud de cada grano.

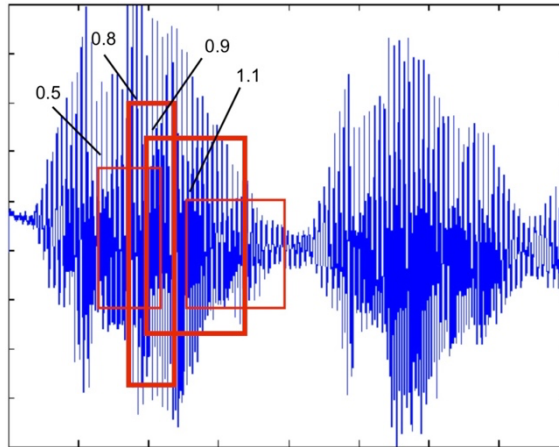


Figura 13. Síntesis granular

## 5.2. Osciladores

El oscilador es un módulo que convierte la corriente continua CC en corriente alterna AC con una frecuencia determinada y amplitud constante. Los osciladores son utilizados en dispositivos de medición y circuitos de procesamiento con el fin de obtener información útil por medio de transductores.

Los osciladores pueden generar algunas formas de onda como sinusoidal, rectangular, triangular y cuadrada. En aplicaciones de audio y radio es necesario cambiar la amplitud y frecuencia, en donde no necesitan de una señal de entrada para generar las formas de onda que deseamos, las oscilaciones son generadas gracias a la retroalimentación positiva que hay en los amplificadores.

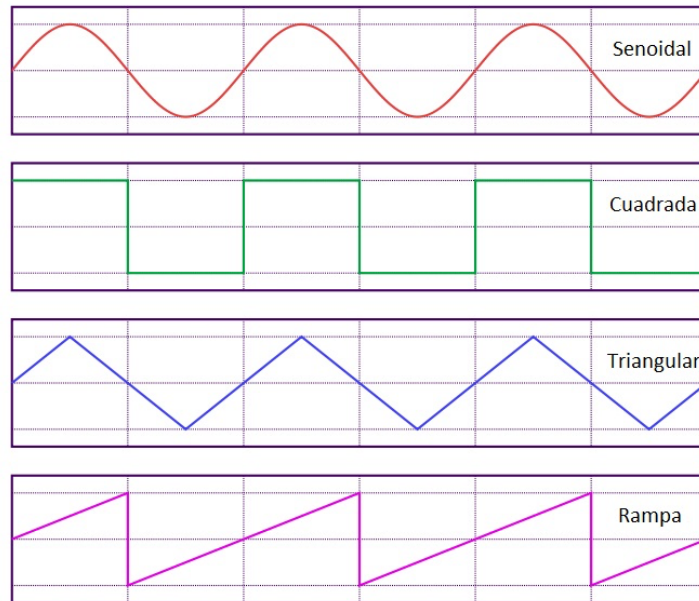


Figura 14. Tipos de ondas en osciladores

### 5.2.1. VCO

Los osciladores controlados por voltaje (VCO) son esenciales en la comunicación de sistemas analógicos y dentro de un sintetizador es el módulo más importante por la capacidad que tiene de poder interpretar el tono que deseamos generar, en donde envía la frecuencia exacta que nuestro oído humano podrá identificar y escuchar como un tono.

Los módulos VCO tienen entradas de voltaje DC y son llamadas CV (Control Voltaje). Estas señales son la representación eléctrica de la frecuencia que identifica a la nota que tocamos, en donde el voltaje tiene una variación de 1V por octava.

Cada octava tiene 12 semitonos, si deseamos calcular la señal CV necesaria para identificar cada nota, es necesario que dividamos 1V entre 12 y el resultado será la separación de voltaje que existe entre cada semitono.

*Cuadro 1. Voltaje de cada semitono*

<b>Nota</b>	<b>Valor de CV</b>
C	0.0000
C#	0.0833
D	0.1666
D#	0.2500
E	0.3332
F	0.4165
F#	0.5000
G	0.5831
G#	0.6664
A	0.7500
A#	0.8330
B	0.9163

### **5.2.2. LFO**

Los osciladores de baja frecuencia (LFO) generan señales por debajo de los 20Hz, por lo que no es posible escuchar dichas señales con el oído humano. Por lo general las señales de estos osciladores se utilizan como señales de control para otros módulos dentro del sintetizador, lo cual permite que variemos parámetros de las señales para generar nuevas intenciones al sonido que sí es audible.

Algunas aplicaciones de los LFO son para generar vibratos o trémolos. Por lo general la forma de onda de estos osciladores son sinusoidal, cuadrada y diente de sierra. La frecuencia de este oscilador es variada de manera independiente, esto quiere decir que no depende de la señal de otro módulo para variar su frecuencia y las oscilaciones se generan gracias a la retroalimentación positiva en cada módulo.

### **5.2.3. VCF**

Los filtros controlados por voltajes (VCF) son parte importante dentro de un sintetizador ya que su función al igual que los VCO, es formar sonidos por medio de la síntesis sustractiva.

El objetivo de los VCF es realizar un filtrado de frecuencias a la señal de entrada, en donde su frecuencia de corte puede cambiar. Al momento de realizar el diseño de un VCF, podemos decidir que tipo de filtro deseamos (pasa bajo, pasa altos, etc).

### **5.2.4. VCA**

Los amplificadores controlados por voltaje (VCA) son los encargados de variar la amplitud de la señal de entrada en función de un voltaje de control. La amplitud puede ser modificada en dos rangos distintos, uno es por modulación de frecuencia mediante un LFO y frecuencia de audio por medio de un oscilador.

El audio es la señal portadora y su amplitud es modulada por un voltaje de control que es la señal moduladora. Las señales moduladora puede ser un LFO, ADSR y la señal portadora por lo general es un tono puro. Como resultado obtenemos una modulación AM.

### 5.2.5. ADSR

ADSR es conocido como un envolvente. Por lo general, los envolventes incluyen 4 controles: Attack, Decay, Sustain y Release.

Attack: Este parámetro define el tiempo que la señal tarda en subir de 0 a 100% su amplitud.

Decay: Ajusta el tiempo que tarda la señal en decaer desde el 100% de la señal hasta el parámetro de sustain.

Sustain: Este parámetro fija la amplitud al mantener pulsada una tecla.

Release: Ajusta el tiempo que tarda en decaer desde el sustain a una amplitud de 0 al soltar una tecla.

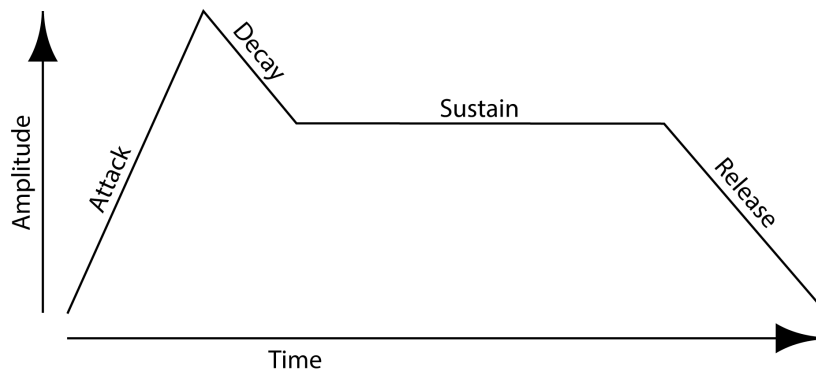


Figura 15. ADSR

### 5.2.6. Ruido

La característica principal del módulo de ruido es producir señales aleatorias a la salida. Si hablamos de ruido de colores, estos pueden ser utilizados como fuente de audio específicamente para generar sonidos no musicales o bien percusivos.

Vamos a definir qué es el Ruido blanco. Este tipo de ruido ocupa todo el rango de frecuencias audibles por el oído humano. En la Figura 17 el eje X muestra la frecuencia y el eje Y la amplitud, donde exactamente todas las frecuencias presentes tienen una misma amplitud con pequeñas variaciones.

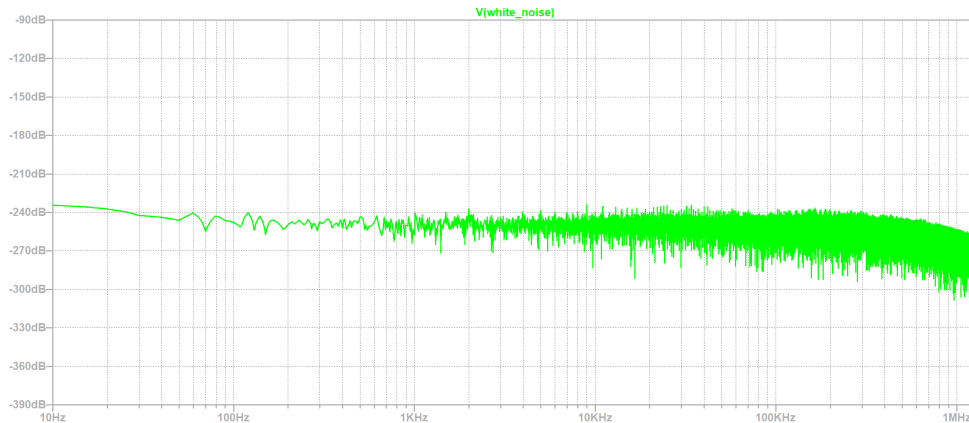


Figura 16. Ruido blanco

Ahora veamos la diferencia de un caso ideal como lo es una onda sinusoidal. Notamos una diferencia de inmediato. Mientras el ruido blanco es distribuido a lo largo de todas las frecuencias audibles, la onda sinusoidal ocupa solo una pequeña parte del espectro. Es por ello por lo que una onda sinusoidal es denominada como un tono puro a diferencia de otros tipos de ondas que están construidas por frecuencias adicionales conocidas como armónicos.

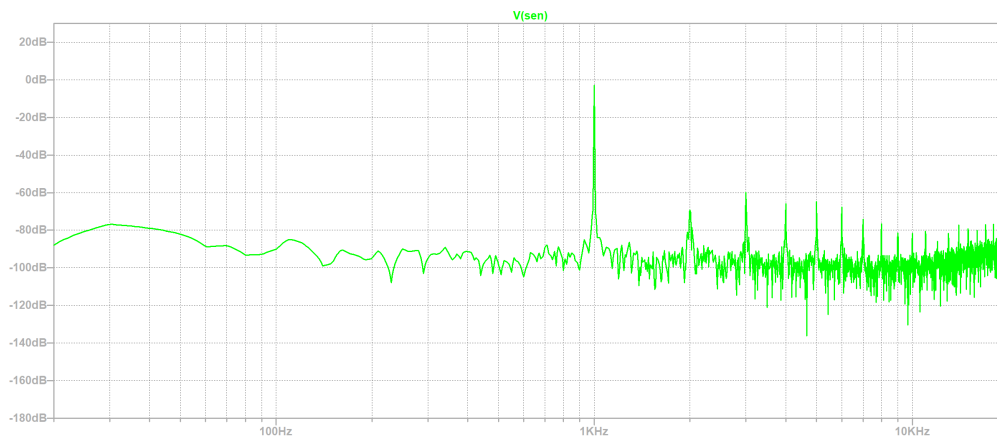


Figura 17. Onda sinusoidal

Veamos este ejemplo; si tenemos una onda sinusoidal, el resultado es una onda suave y repetitiva, pero al tener el ruido blanco, notamos un desorden aleatorio. Mientras más aleatorio es un sonido, nuestros oídos los percibirán más ruidoso. Si lo vemos desde el punto de vista electrónico, el sonido es codificado como fluctuaciones de voltaje a lo largo del tiempo.

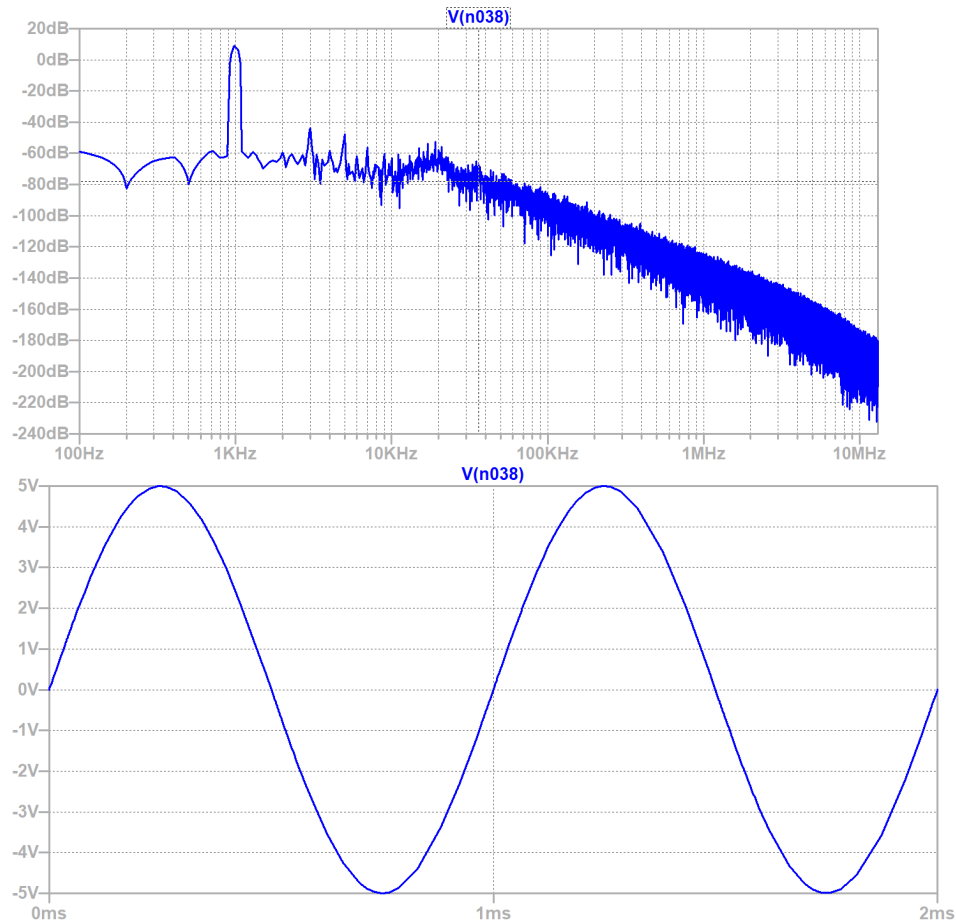


Figura 18. Ejemplo de ruido y tono puro en el tiempo

### 5.3. Comunicación MIDI

MIDI está definido por sus siglas en inglés que significa “Musical Instrument Digital Interface” (Interfaz Digital de Instrumentos Musicales). Este es un protocolo de comunicación utilizado para controlar y poder conectar distintos instrumentos electrónicos como sintetizadores, secuenciadores, controladores, computadoras y demás dispositivos musicales electrónicos para comunicarse y así generar sonidos.

El uso de MIDI ha evolucionado y es utilizado para realizar interpretaciones en vivo, composiciones musicales, mezcla, edición y producción de audio; pero no solo se ha quedado en la parte musical, también se ha involucrado en juegos electrónicos, robótica, iluminación de escenario y actuaciones en vivo.

La comunicación MIDI es un protocolo diseñado para transferir información de las interpretaciones musicales; lo cual no es *música*, a diferencia de realizar una grabación de audio de un instrumento musical. Los comandos enviados por medio de la comunicación MIDI son mensajes digitales con la capacidad de describir la interpretación y poder replicarla por medio de un sintetizador con mucha precisión.

### **5.3.1. Historia**

La música electrónica existe desde 1940, en los años sesenta surgen los primeros sintetizadores comerciales los cuales eran instrumentos totalmente analógicos y monofónicos; solo podían generar una nota a la vez.

Para poder generar más notas a la vez, surgió la idea de conectarlos entre sí y así permitir el control de distintos instrumentos a partir del teclado de uno de ellos y así conseguir que varias notas estuvieran sonando al mismo tiempo. Las primeras comunicaciones se dieron de manera analógica, lo cual hacía que el voltaje de la señal fuera proporcional a la frecuencia deseada. Aunque ya se podía tener más de un instrumento sonando al mismo tiempo, aún no era posible producir más de una nota, ya que la suma de dos voltajes producía una nota más aguda y no dos notas separadas.

La primera solución surgió en el año 1981 y se llamó USI (Universal Synthesizer Interface), Este protocolo no fue universal, por lo que en 1983 surgió el protocolo estándar para permitir la conexión entre aparatos, independientemente del fabricante conocido como MIDI. En este tiempo los sintetizadores ya hacían uso de electrónica digital y utilizaban algoritmos matemáticos para producir formas de ondas, luego eran convertidas a señales de audio por medio de convertidores de digital a analógico (DAC).

Ya se podían generar ondas de manera digital, el siguiente reto era poder conectar distintos sintetizadores entre sí. En un principio los músicos necesitaban tener distintos teclados para generar los distintos sonidos, ahora se deseaba que con un solo teclado se pudiera generar cualquier tipo de sonidos con solo presionar un botón para decidir que sonido y cuando lo deseaban.

### **5.3.2. Hardware**

La mayoría de los dispositivos MIDI tienen la capacidad de enviar o recibir información, pero esto dependerá de la función que estén realizando. Si un dispositivo MIDI envía mensajes, se le denomina Maestro (Master) y quien recibe y responde a los mensajes es denominado Esclavo (Slave).

Los dispositivos MIDI se clasifican en:

#### **5.3.2.1. Controladores**

Estos dispositivos se encargan de producir los mensajes MIDI; su tarea es mencionar si es necesario realizar la activación o desactivación de una nota, variaciones de tono e

intensidad del tono. El controlador más conocido es como un teclado, sin embargo en la actualidad existen más dispositivos MIDI como guitarras, parches de percusión, clarinetes electrónicos y más.

### 5.3.2.2. Generadores de sonido

Estos dispositivos son módulos de sonidos, en donde reciben mensajes MIDI y son transformados en señales de audio.



Figura 19. Controlador MIDI

### 5.3.3. Conexiones

La comunicación MIDI se da por medio de un protocolo de datos en serie, esto significa que los mensajes son enviados por un “bit” a la vez a través de un cable. El “bit” es un dígito binario lo cual nos da información de encendido o apagado o bien 0 o 1. En la comunicación MIDI los bits son agrupados en “bytes” de 8 o 10 bits. Los bytes pueden ser combinados entre comandos o mensajes, si tenemos comandos, estos pueden tener uno, dos, tres o muchos bytes y MIDI se encarga de especificar de qué manera se estructuran y se descifrarán los comandos.

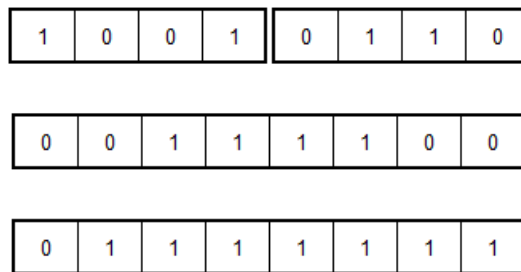


Figura 20. Comunicación MIDI por bits

Las especificaciones de MIDI contienen una parte de hardware (especificaciones eléctricas; MIDI-DIN) y software (especificación de mensajes; Protocolo MIDI).

Al enviar una señal MIDI por medio de un cable MIDI-DIN, la señal enviada es un pulso, como una onda cuadrada que se transmite 31.250 veces por segundo en una línea de +5 voltios.

### 5.3.4. Cables y conectores

Los cables MIDI utilizan conectores de tipo DIN de 5 pines. La transmisión de datos utiliza solo un cable, en donde hay 5 pines, de los cuales 1 y 3 son reservados para funciones adicionales que pueden ser añadidas, 2 y 4 son pines con blindaje utilizados para transmitir una tensión de +5 voltios. El objetivo de los cables MIDI es poder comunicar dos dispositivos y permitir la transmisión de datos entre sí.

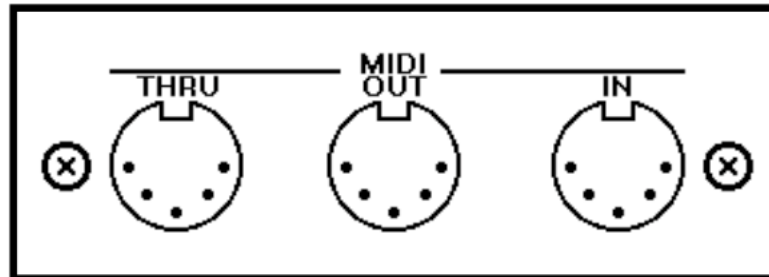


Figura 21. Conectores MIDI

## 5.4. DAW

Es una estación de trabajo para audio digital donde se puede grabar, editar y mezclar audio. Los DAWs han evolucionado en la industria del audio a tal punto que se han convertido en una herramienta poderosa para los productores y músicos permitiendo crear música profesional desde sus computadoras.

Algunos DAWs populares en la industria son los siguientes:

- Pro Tools: su mayor uso es en los estudios profesionales de grabación por las características avanzadas y se ha convertido en el estándar de la industria.
- Ableton Live: su principal uso es para presentaciones en vivo por su interfaz amigable.
- Logic Pro X: uso común dentro de usuarios con un ecosistema Apple, esto facilita el flujo de trabajo además de tener potentes herramientas para la creación de música.
- FL Studio: ideal para principiantes gracias a su interfaz amigable.

(Instituto en Audio, 2025)

Para realizar el Sintetizador Analógico Modular fue necesario hacer una investigación de los módulos que son parte de un sintetizador modular comercial. Dentro de ellos están todos los módulos descritos en el capítulo anterior. En este proyecto nos enfocaremos en un oscilador controlado por voltaje (VCO), oscilador de baja frecuencia (LFO), mixer (mezclador) y un generador de ruido blanco.

### 6.1. Oscilador controlado por voltaje (VCO)

El oscilador es parte fundamental dentro de un sintetizador, como se mencionó anteriormente, este es controlado por un voltaje DC, en donde la razón de conversión de tensión continua a frecuencia es por 1V/Octava. El objetivo es poder obtener una onda sinusoidal y una onda cuadrada a la salida con un valor de 10Vpp al momento de aplicar un voltaje a la entrada. El voltaje de entrada dependerá de la frecuencia que deseemos tener a la salida y será enviado por mensajes MIDI desde un controlador.

El elemento principal del Oscilador es la etapa que consigue convertir un voltaje DC en una oscilación, adicional es esencial añadir más etapas para adaptar las señales de entrada y salida para generar el match de impedancias y así recibir 1V/OCT y dar a la salida los 10Vpp sin pérdidas.

La configuración más común para obtener oscilaciones de onda cuadrada y onda triangular consiste en un amplificador operacional que se encuentran en retroalimentación positiva U2 con configuración de Schmitt trigger no inversor el cual funciona como un comparador con histéresis. Al tener una configuración de comparador, obtenemos dos valores a la salida; las tensiones de saturación. Por lo general los valores de las tensiones de saturación son la tensión de alimentación menos 2 voltios. A la salida obtendremos  $V_{SATH}$  (nivel alto) y  $V_{SATL}$  (nivel bajo).

Si analizamos el circuito, en  $t = 0$  el circuito empieza a ser alimentado y el Schmitt trigger pone su salida en nivel alto. El amplificador operacional U1 está en retroalimentación negativa, esto quiere decir que las dos terminales de entrada están en corto virtual y con voltaje 0. La impedancia infinita de entrada del amplificador no permite que la corriente entre por la terminal negativa, lo cual hace que la corriente que cruza R carga el capacitor C a un ritmo constante gracias a la tierra virtual a la que es conectada, mientras que la otra placa del capacitor está provocando una descarga de electrones de manera lineal en el tiempo.

La descarga lineal en el tiempo es conectada a la entrada del Schmitt trigger y al llegar a su señal mínima  $V_{SATL}$ , el Schmitt trigger cambia el estado de comparación colocando la salida en nivel bajo  $V_{SATL}$ . La placa izquierda del capacitor se carga con  $V_{SATH}$  y se descarga por medio de R, mientras que la otra placa empieza a cargarse. Cuando la tensión entre las terminales del capacitor sea 0V el proceso vuelve a repetirse con valores negativos para completar un ciclo de la onda. El Schmitt trigger espera que se obtenga nuevamente el  $V_{SATH}$  para poner su salida en nivel alto. Este proceso se repetirá de manera periódica.

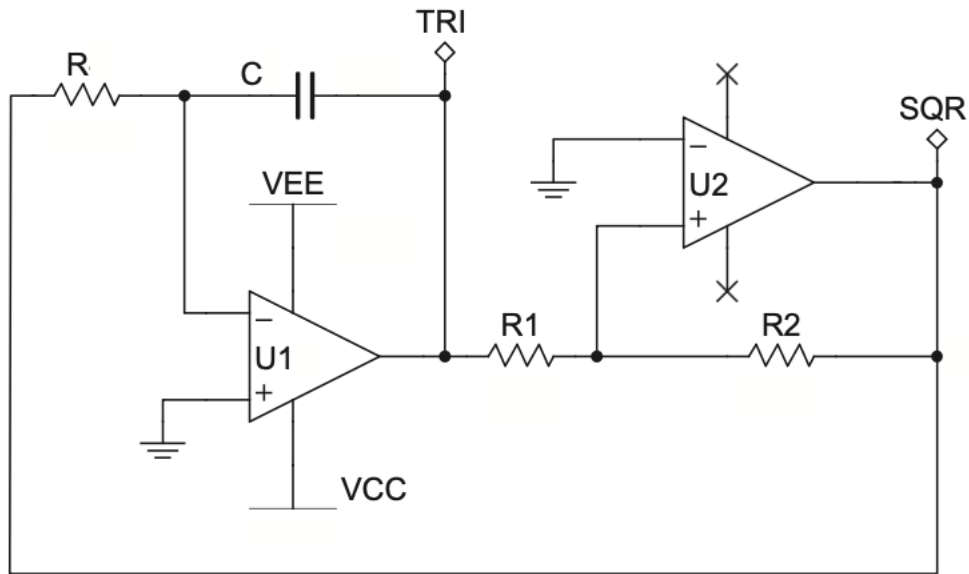


Figura 22. Oscilador de onda triangular y cuadrada

El capacitor necesita de la mitad del periodo para pasar de  $V_{SATL}$  a  $V_{SATH}$ . Al cargarse el capacitor de manera constante podemos hacer uso de la siguiente expresión:

$$C\Delta V = I\Delta t$$

Y al sustituir

$$C2V_{SATH} = \frac{V_{SATH} T}{R} \frac{1}{2}$$

En donde despejamos T y sustituimos por  $1/f$  para obtener la frecuencia de oscilación.

$$f = \frac{1}{4RC}$$

Con esta ecuación definimos que, al variar R o C, la frecuencia de oscilación puede ser modificada.

El reto de este oscilador es poder modificar la frecuencia por medio de un voltaje de entrada y no desde la modificación de un componente electrónico. Para realizar este tipo de cambios en frecuencia el circuito cambia y es necesario que el Schmitt trigger tenga valores de saturación  $V_{CC} = 10V$ , esto es necesario para limitar el voltaje pico – pico de la señal cuadrada y así obtener valores intermedios y poder corregirlos para obtener el voltaje deseado a la salida.

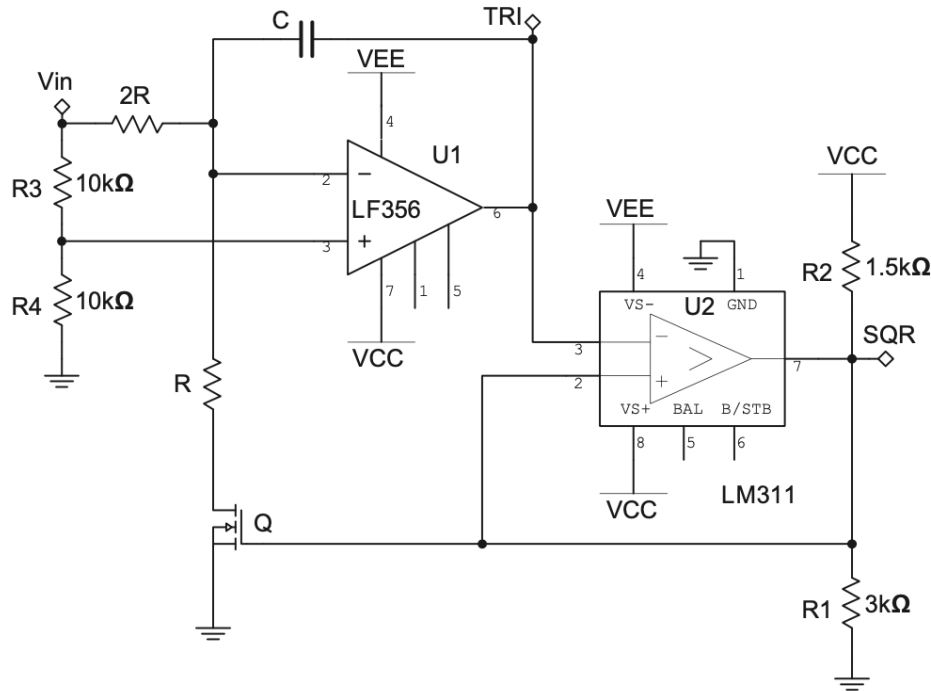


Figura 23. Oscilador controlado por voltaje

Para este análisis, cuando Schmitt trigger empieza en nivel alto el voltaje de la señal cuadrada;  $V_{SQR} = 10V$ , con un valor alto a la salida de esta onda, el MOSFET Q está en ON y R coloca una de las terminales a tierra. Al tener el primer amplificador en cortocircuito virtual en las terminales de entrada, el voltaje que se exige es dado por las resistencias  $R_3$  y  $R_4$ , que al ser de valores iguales  $V_{in}/2$  y la corriente que cruza R es  $V_{in}/2R$ , pero por la resistencia  $2R$  la corriente será la mitad  $V_{in}/4R$ . Según la ley de nodos de Kirchhoff la corriente total debe ser cero, por lo que el capacitor C conectado a ese nodo empieza a descargarse y al otro extremo el voltaje empieza a crecer de manera lineal. Cuando el voltaje de salida de la onda triangular llega a  $10V$ , el Schmitt trigger cambia de estado y el  $V_{SQR} = 0V$ , entonces el voltaje en el MOSFET baja y se pone en estado de OFF lo cual baja la corriente que atraviesa R a  $0A$ . La corriente que pasa por  $2R$  sigue siendo la misma, esto asegura que el capacitor sea cargado de la misma manera que se descarga. Al otro lado del capacitor la onda triangular disminuye hasta  $0V$  y en ese punto el Schmitt trigger cambia de estado y se repite el proceso.

En la práctica, el voltaje de saturación del Schmitt trigger provoca que el valor del voltaje a la salida sea 5V. En este caso la ecuación para determinar la frecuencia cambia y es:

$$C * 5 = \frac{V_{in} T}{4R}$$

En donde despejando T y sustituyendo por 1/f:

$$f = \frac{V_{in}}{40RC}$$

El oscilador oscila a una frecuencia que es directamente proporcional al voltaje de entrada  $V_{in}$  con cambios lineales. La señal CV que llega al VCO es de 1V/Octava y por lo general los osciladores funcionan con 1V/Hz, por lo que no habría coherencia de manera musical al momento de producir los sonidos. Para corregir este error es necesario agregar una etapa antes del oscilador para convertir las tensiones de 1V/Oct a 1V/Hz y esto lo logramos al convertir una relación lineal a exponencial.

Los circuitos exponenciales ven la capacidad de los componentes semiconductores para poder convertir las tensiones de corriente a forma exponencial. La Figura 24 ilustra el efecto en un transistor bipolar BC547 donde el eje Y se encuentra en escala logarítmica y la curva exponencial tiene un aspecto de línea recta. Esta función tensión-corriente está basada en el modelo Ebers-Moll donde su corriente está definida de la siguiente manera:

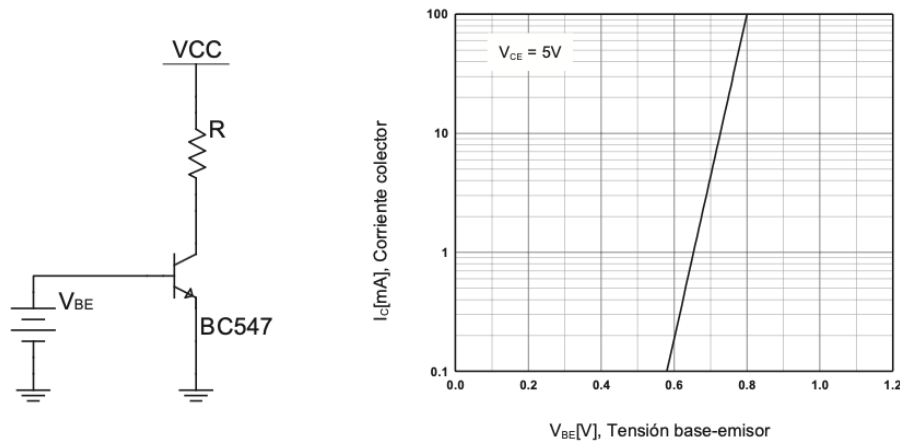


Figura 24. Conversión exponencial con un transistor

$$I_c = \alpha_T I_{ES} \left( e^{\frac{V_{BE}}{V_T}} - 1 \right)$$

Donde:

$I_{ES}$  = corriente de saturación inversa de la unión PN de base-emisor  
 $\alpha_T$  = ganancia de corriente directa en configuración de base común. Este valor está definido por la proporción entre la corriente del colector y emisor

$$\alpha_T = \frac{I_C}{I_E}$$

$V_{BE}$  = tensión base-emisor  
 $V_T$  = voltaje térmico

Es importante mencionar que el comportamiento del transistor se ve afectado por los cambios de temperatura, al obtener un pequeño cambio en los grados de temperatura, esto puede afectar la salida por completo.

Para no depender de solo un transistor, se realiza un enfrentamiento de transistores como se muestra en la Figura 25. En este modelo cada transistor actúa como convertidor que se define con la siguiente fórmula:  $I_c = \alpha_T I_{ES} (e^{\frac{V_{BE}}{V_T}} - 1)$ , pero al enfrentarse entran a la ecuación dos tensiones base-emisor  $V_{BE1}$  y  $V_{BE2}$  y dos corrientes de colector  $I_{C1}$  y  $I_{C2}$ . Para esto simplificamos la expresión y asumiendo que  $I_{ES1} = I_{ES2}$  a la misma temperatura, podemos trabajar con la siguiente ecuación:

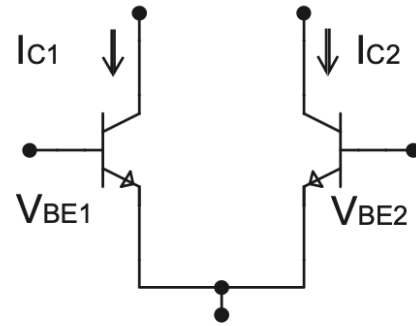


Figura 25. Enfrentamiento de transistores

$$\Delta V_{BE} = V_{BE2} - V_{BE1} = V_T \ln \left( \frac{I_{C2}}{I_{C1}} \right)$$

Ya puesto en práctica, en lugar de tener 4 variables hacemos 2 de estas variables constantes. El voltaje base-emisor  $V_{BE2}$  se conecta a tierra lo cual lo convierte en valor 0V y la corriente  $I_{C1}$  se hace constante por medio de la resistencia  $R_{ref}$  la cual hace que la corriente sea una  $I_{ref}$ .

En el circuito completo tenemos un amplificador en retroalimentación negativa, en donde el colector de  $Q_1$  se conecta a la tierra virtual asegurando que la corriente  $I_{ref}$  sea constante.

Con eso en mente despejamos para  $I_{C2}$

$$I_{C2} = I_{ref} * e^{\frac{\Delta V_{BE}}{V_T}}$$

Al momento de tener  $V_{BE2}$  conectado a tierra, la entrada a la base del transistor  $Q_1$  se convierte en un voltaje negativo ( $-\Delta V_{BE}$ ) por lo que será necesario colocar una etapa de amplificación negativa en el circuito. En este circuito la resistencia R limita la corriente en el exponenciador Q2 se define por la siguiente ecuación:

$$I_{Q2} = \frac{V_{SAT}}{R}$$

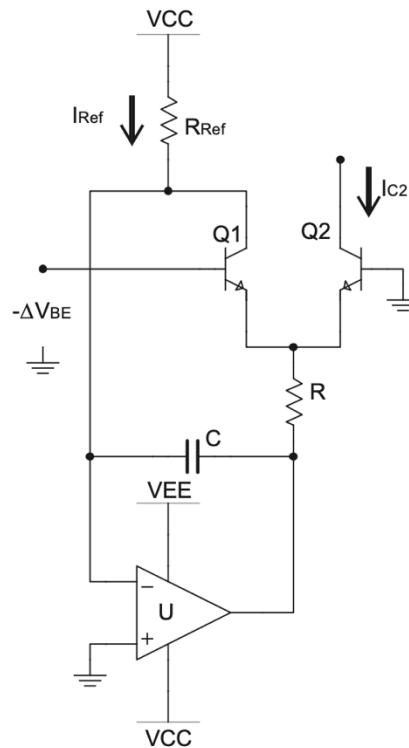


Figura 26. Exponenciador con transistores

Seguido del exponenciador se coloca un trimmer para realizar una calibración en donde los cambios de voltaje no se vean afectados por la temperatura. Para que esto suceda es necesario convertir la corriente a voltaje, entonces contamos con un convertidor I-V de un amplificador operacional el cual trabaja con base en la siguiente expresión:

$$V_o = -RI_i$$

En donde el valor de la resistencia es  $20k\Omega$  y la función del trimmer es controlar el paso de voltaje a la base de Q1 y es ahí donde se calibra el exponenciador para cubrir la mayor parte del rango de un teclado de 5 octavas. En la Figura 27 se muestra toda la etapa del

exponenciador junto con la etapa previa la cual es un amplificador inversor para realizar la suma de las señales de entrada y la etapa posterior para realizar la calibración final.

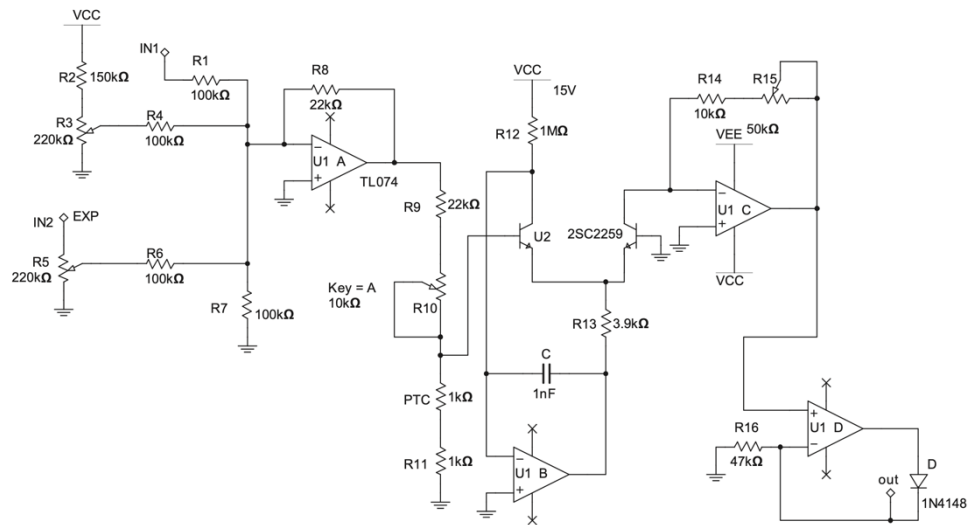


Figura 27. Diseño del exponenciador

Lo siguiente que debemos de hacer es partir de la onda triangular y obtener la onda sinusoidal. Este proceso es conocido como waveshaping y la Figura 28 ilustra este proceso. Los circuitos que generan este tipo de señales hacen uso de elementos no lineales como lo son transistores y diodos en donde parten por redes de resistencias y diodos para realizar aproximaciones a partir de secciones lineales de la curva de transferencia.

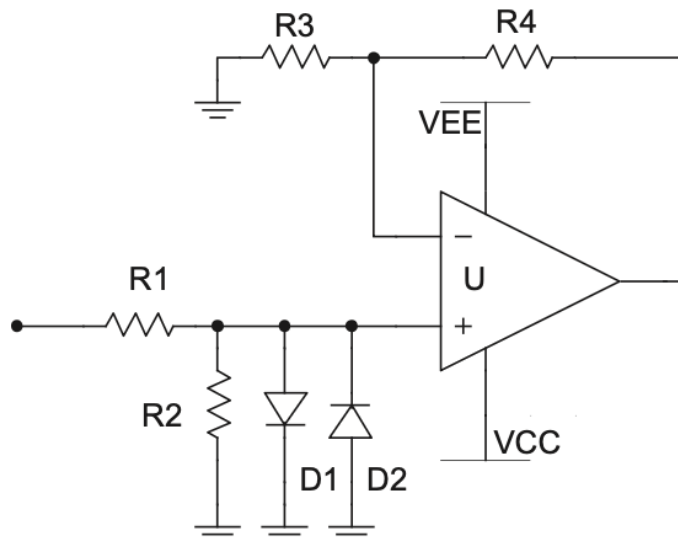


Figura 28. Conversión de onda triangular a onda sinusoidal

A continuación, en la Figura 29 se muestra el diagrama de bloques del funcionamiento general del VCO. Es importante notar que a la entrada obtenemos señales de voltaje DC por lo que seguidamente pasamos a la etapa del exponenciador para pasar de señales lineales a señales exponenciales. Esas señales modificarán las ondas generadas en el oscilador y por lo tanto la onda cuadrada y seno serán afectadas en su comportamiento. Sin embargo, si no tenemos nada a la entrada, de igual manera el oscilador generará la onda cuadrada, pero es importante mencionar que para generar la onda seno es necesario agregar una etapa adicional para convertir la onda triangular a onda sinusoidal.

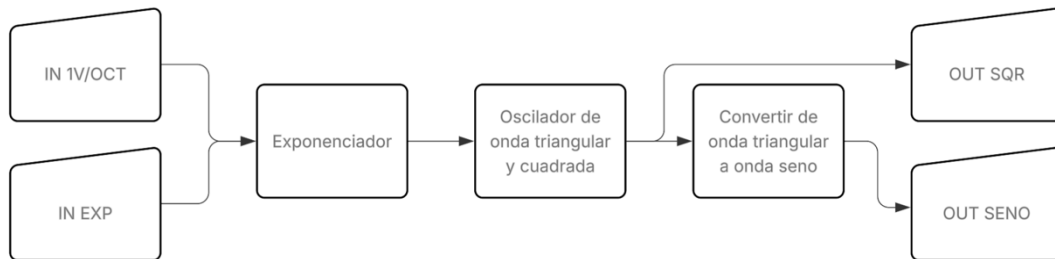


Figura 29. Diagrama de bloques VCO

## 6.2. Oscilador de baja frecuencia (LFO)

El Oscilador de Baja Frecuencia tiene la característica que no es un VCO ya que no depende de ninguna señal de control, adicional a que el rango de frecuencia de oscilación es en frecuencias bajas. Este módulo está conformado por un circuito oscilador de onda triangular y onda cuadrada. Dentro tenemos a U1 como un amplificador integrador y U2 como un Schmitt Trigger. Adicional, tiene la capacidad de poder variar la frecuencia y el ciclo de trabajo.

Partiendo de este diseño, se busca cargar y descargar un capacitor por medio del paso de corriente. Por ejemplo, si la salida del amplificador U2 está en alto, quiere decir que la corriente que está fluyendo se acumula en C1 y el voltaje disminuirá linealmente en el tiempo para descargarse positivamente y empezar a cargarse de forma negativa.

Pero si la salida del amplificador U2 está en bajo, la corriente se invierte y empieza a descargarse de forma negativa para luego cargarse de manera positiva. Este proceso se repite de manera periódica.

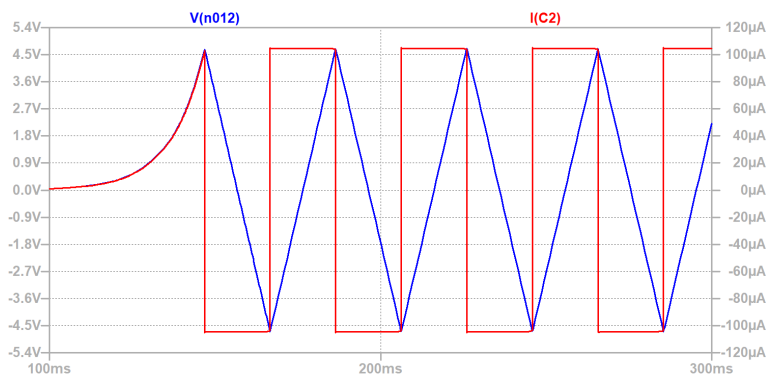


Figura 30. Carga y descarga del capacitor

Si deseamos que la frecuencia sea variable, podemos conseguirlo a partir de variar los valores de R o C, lo más práctico será variar R por medio de un potenciómetro.

La siguiente fórmula nos muestra cómo podemos determinar la frecuencia de oscilación del circuito:

$$f = \frac{1}{4RC}$$

Donde:

R = valor de la resistencia

C = valor del capacitor

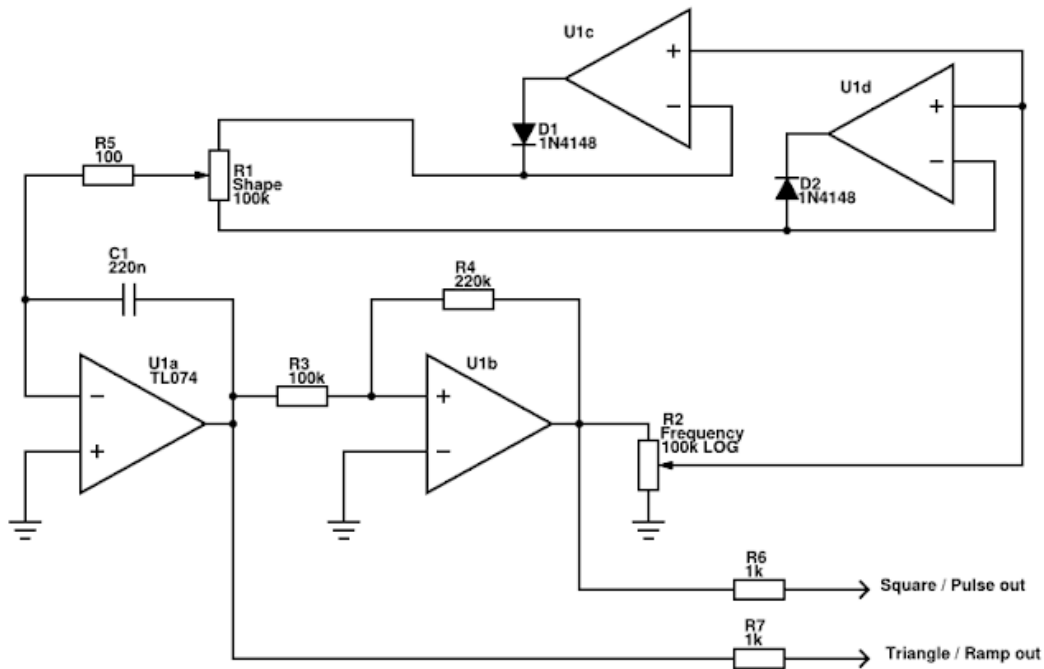


Figura 31. LFO de onda variable

Partiendo de este diseño R1 y R2 serán potenciómetros para poder variar los valores de las resistencias de una manera más práctica. En el caso de R1 modifica la forma de onda y cada mitad del potenciómetro es alimentado por un diodo, en donde uno conduce la rampa de voltaje hacia arriba y el otro conduce la rampa hacia abajo, esto es para compensar la caída de voltaje de los diodos. Es importante mencionar que el ciclo de trabajo será el mismo independientemente de la forma de onda. Ahora R2 se encarga de modificar la frecuencia en donde el voltaje es reducido y es así como la corriente carga o descarga la señal.

Los diodos son implementados como rectificadores, esta configuración ayuda a que el oscilador tenga un rango de frecuencia más amplio y los amplificadores operacionales ayudan a permanecer con la señal bien ajustada aun cuando está a baja frecuencia.

En la Figura 31 se encuentra el diagrama de bloques el cual muestra el flujo de trabajo del LFO, este módulo está compuesto por un oscilador para generar la onda triangular y la onda cuadrada, luego tenemos 2 etapas compuestas por potenciómetros, uno para modificar

la forma de onda por medio de la carga y descarga del capacitor y la otra etapa para modificar la frecuencia de oscilación. Por último, tenemos la etapa de salida la cual entrega la onda triangular y la onda cuadrada, dentro de esta etapa es importante mencionar que tenemos amplificadores seguidores para mantener el match de impedancia donde se busca tener una impedancia baja a la salida.

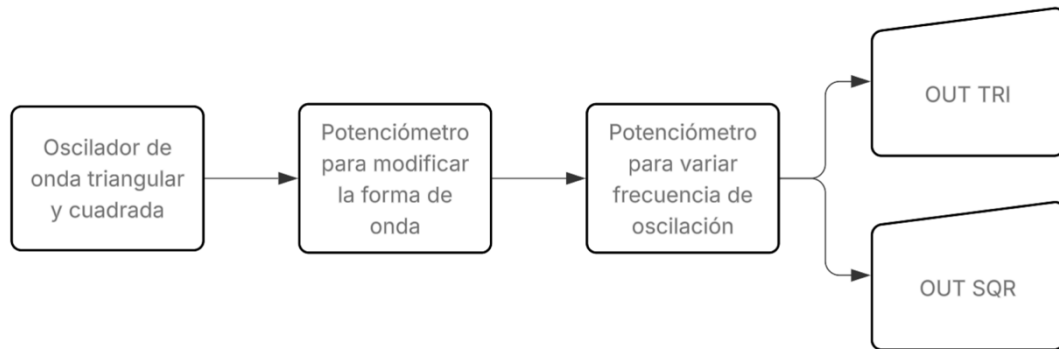


Figura 32. Diagrama de bloques LFO

### 6.3. Mixer

El mezclador es el que se encarga de recibir las señales de audio de los distintos módulos como lo son el VCO, VCF y VCA. Para este módulo hacemos uso de un amplificador sumador inversor el cual permite recibir 3 entradas y a partir de ellas se obtiene una sola señal a la salida. La función principal es poder sumar las señales de entrada y modificar la ganancia individual de cada una de ellas.

La configuración del mezclador de manera comercial utiliza potenciómetros deslizable conocidos como “Faders”, los valores más utilizados son de 50k y 100k. Para esta aplicación haremos uso de potenciómetros normales, la ventaja de ello es que podemos modificar la ganancia de entrada de cada señal de manera independiente. Estas señales de entrada van directamente a la entrada negativa del amplificador con retroalimentación negativa, donde tenemos una resistencia de 100K, mientras que la entrada no inversora está colocada a tierra. La función del amplificador es amplificar el diferencial de voltaje a la entrada y multiplicarlo por la ganancia. En este diseño la señal de salida se ve afectada por la señal de entrada y esta configuración ayuda a que el sistema sea estable.

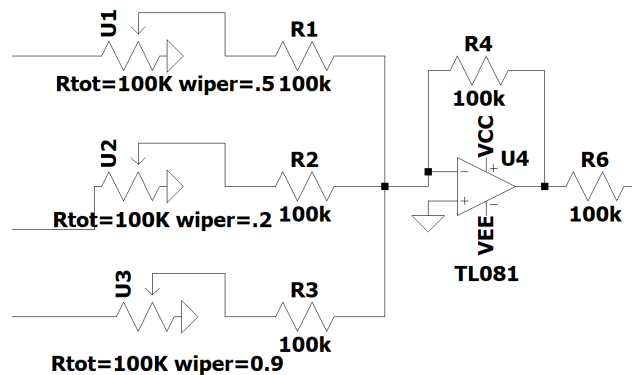


Figura 33. Entrada del mixer

Para obtener a la salida la señal en su correcto orden, es necesario volver a invertir la señal para tener la misma polaridad que las señales de entrada. Para esto agregamos otro

amplificador inversor y adicional para manejar un volumen general, modificamos la resistencia de ganancia por un potenciómetro del mismo valor.

Se utilizan amplificadores en configuración inversora para poder atenuar por completo la ganancia, ya que con una configuración no inversora no es posible atenuar por completo.

Ganancia OpAmp Inversor

$$G = -\frac{R_f}{R_1}$$

Adicional es importante agregar un amplificador seguidor para mantener siempre el match de impedancia.

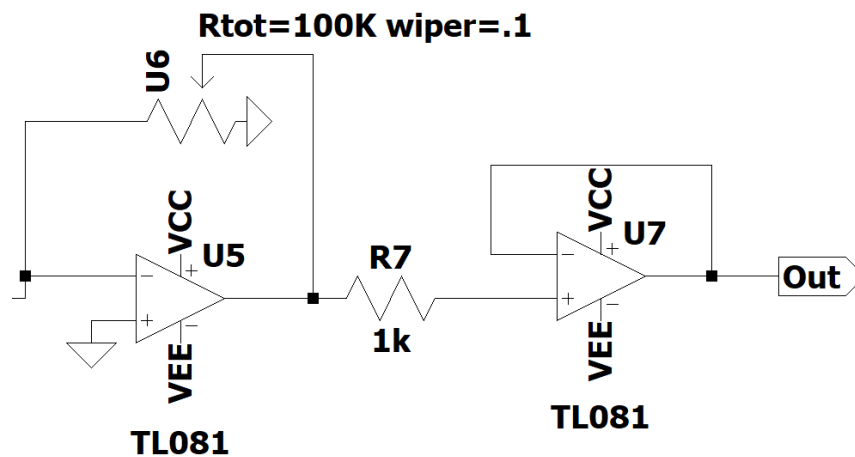


Figura 34. Etapa de salida del mixer

En la Figura 35 se muestra el diagrama de bloques del mixer donde tenemos 3 entradas donde cada entrada puede modificar su ganancia, seguidamente estas señales de entrada son sumadas por un amplificador sumador inversor, luego contamos con una etapa de amplificación donde nos encontramos con un amplificador inversor para convertir la señal de salida con la misma polaridad que las señales de entrada y por último contamos con la etapa de salida que está compuesta por un amplificador seguidor para mantener el match de impedancia.



Figura 35. Diagrama de bloques mixer

## 6.4. Noise

El ruido desde el punto de vista físico es solamente vibraciones en un medio, no hay diferencia entre un sonido. Pero al estar en el contexto de sintetizadores, existen diferentes tipos de ruido como lo es el ruido rosa, blanco y azul.

A continuación, se muestra el circuito a utilizar para generar el módulo de ruido el cual solo necesita de dos componentes; transistor y resistencia, donde el emisor del transistor está conectado a una resistencia, la base está conectada a tierra y el colector a la fuente de voltaje. La función principal del transistor es poder convertir las fluctuaciones de corriente en fluctuaciones de voltaje. Es importante notar que el circuito principal genera el ruido blanco con todo el rango de frecuencias y partimos de esa etapa para generar el ruido rosa y el ruido azul.

Para que podamos escuchar el ruido es necesario agregar una etapa de amplificación y será necesario centrar la señal, donde se hace uso de un filtro pasa alto permitiendo únicamente el paso de frecuencias altas a partir de la frecuencia de corte definida por la siguiente ecuación:

$$F_c = \frac{1}{2\pi RC}$$

La configuración del amplificador es un amplificador inversor con una ganancia muy alta para poder saturar nuestra señal y permanecer con el ruido generado en la etapa anterior.

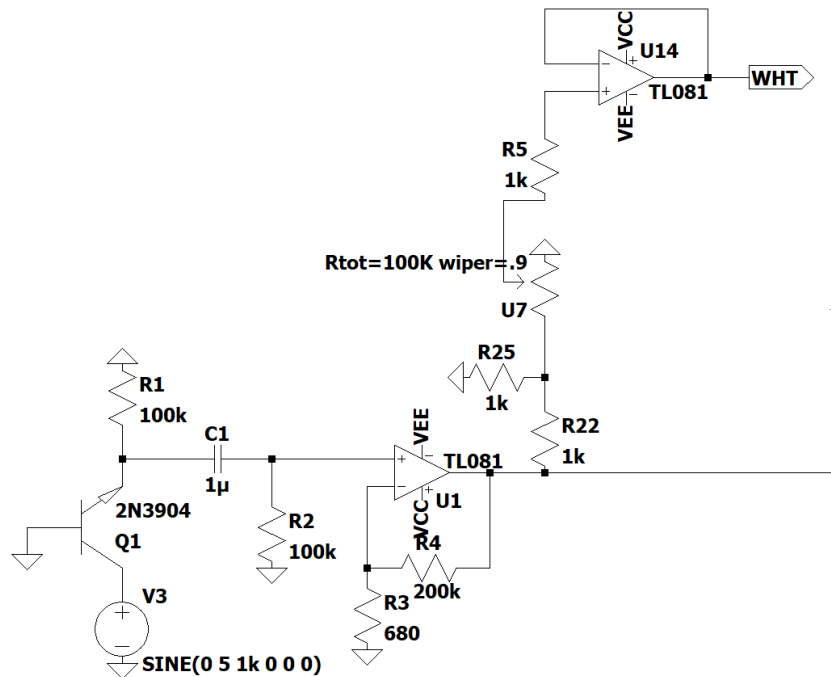


Figura 36. Circuito ruido blanco

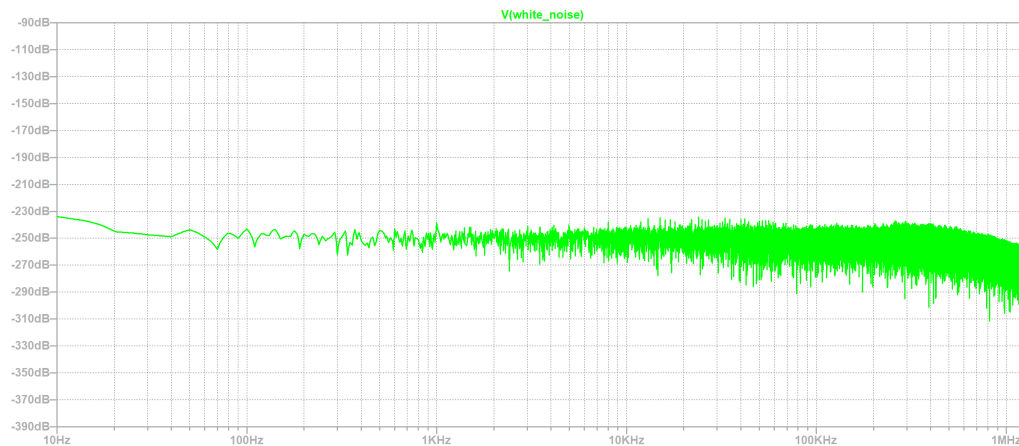


Figura 37. Ruido blanco

Es importante mencionar que un filtro normal compuesto por resistencias y capacitores tiene una disminución de  $-6\text{dB/Oct}$ , pero necesitamos que esa pendiente de disminución sea de  $-3\text{dB/Oct}$ . Para cumplir con este requerimiento hacemos uso de Shelf Filter con pendientes separadas. La función de estos filtros es dejar pasar cierta cantidad de frecuencias en lugar de hacer un corte total de frecuencias. Para esto haremos uso de 3 Shelf Filter por cada rango de frecuencia, alto, medio y bajo.

Este tipo de filtros es exactamente igual a un filtro pasa bajo normal, con la diferencia que se agrega una resistencia entre el capacitor y tierra. ¿Por qué hacemos esto?, suponiendo que solo tenemos el filtro pasa bajo normal, al medir a la salida, tendremos un valor 0V en frecuencias altas porque hace un corte. Ahora en lugar de realizar un corte por completo, agregamos una resistencia para trabajar como un divisor de voltaje lo cual produce que la salida no sea 0V.

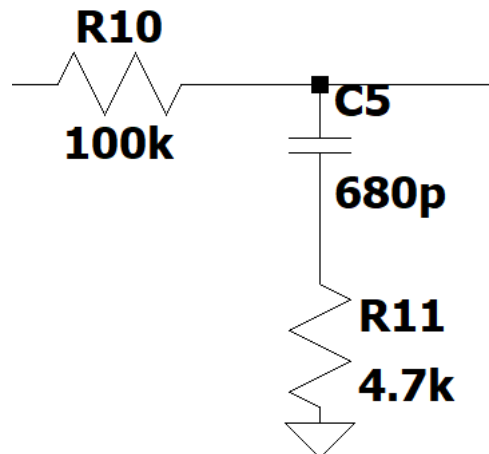


Figura 38. Shelf filter

Teniendo en mente este diseño, para convertir el ruido blanco a *ruido rosa*, hacemos uso de resistencias y capacitores que cumplen la función de filtros pasa-bajos con el diseño shelf filter. La elección de los valores es realizada con base en el rango de frecuencia que deseamos atenuar, las cuales serán altas, medias y bajas para obtener la disminución -3dB/Oct. Seguido del filtro colocamos una etapa de amplificación que sea lo suficientemente grande para poder escuchar el ruido.

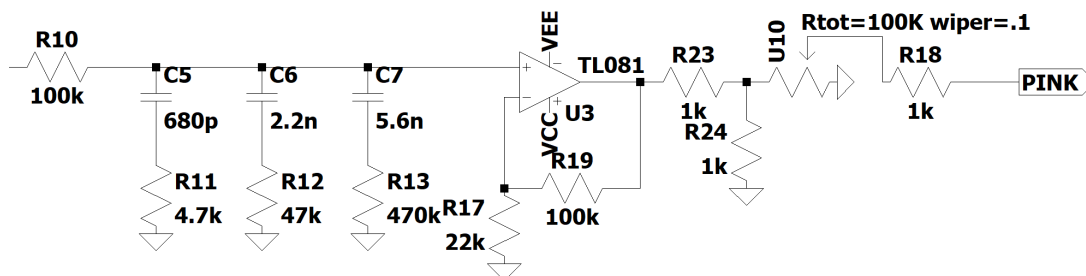


Figura 39. Ruido blanco a ruido rosa

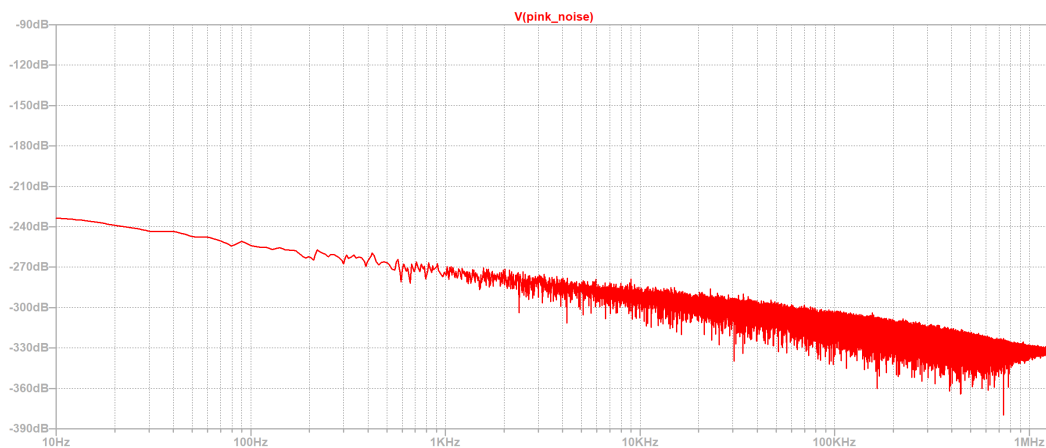


Figura 40. Ruido rosa

Lo mismo sucede al momento de convertir el ruido blanco a *ruido azul* con la diferencia que hacemos uso de filtros pasa-altos con el diseño shelf filter para atenuar frecuencias graves, donde es importante realizar la elección de los valores de los capacitores y resistencias en relación con el rango de frecuencias que deseamos atenuar. El ruido azul tiene la característica que el espectro disminuye  $-3\text{dB/Octava}$  en frecuencias bajas.

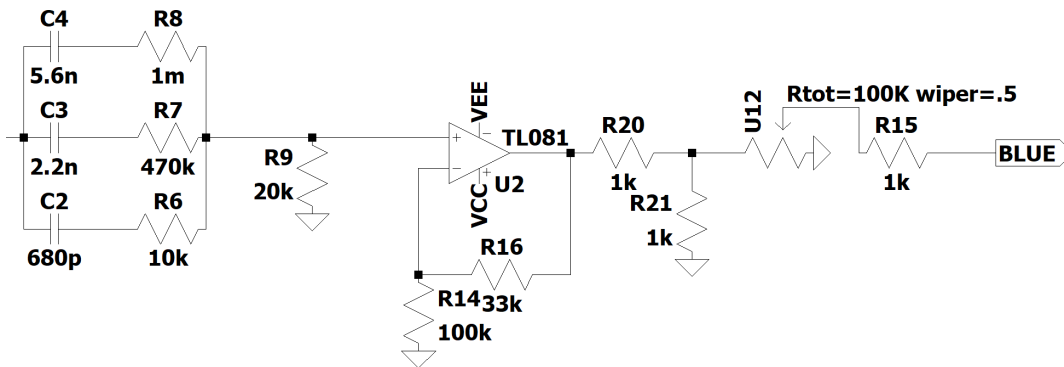


Figura 41. Ruido blanco a ruido azul

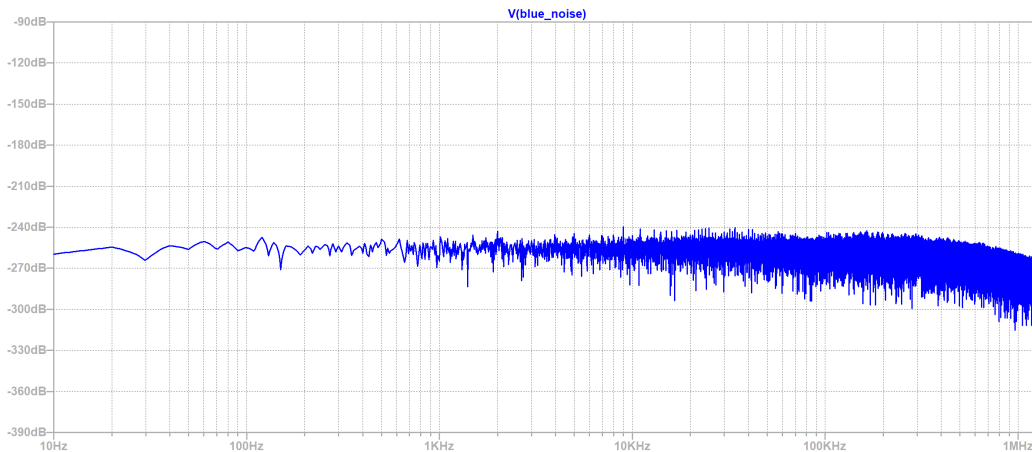


Figura 42. Ruido azul

En la Figura 43 se muestra el diagrama de bloques del módulo de ruido donde la primera etapa se encarga de generar el ruido blanco por medio un capacitor y una resistencia, seguidamente tenemos dos tipos de filtros, pasa-bajos para generar el ruido rosa y pasa-altos para generar el ruido azul. Cada uno de estos filtros tienen el diseño de Shelf Filter para realizar la disminución de  $-3\text{dB/Oct}$ . Después contamos con la etapa de amplificación para aumentar la ganancia del ruido y por último la etapa de salida con amplificadores seguidores para mantener el match de impedancias.

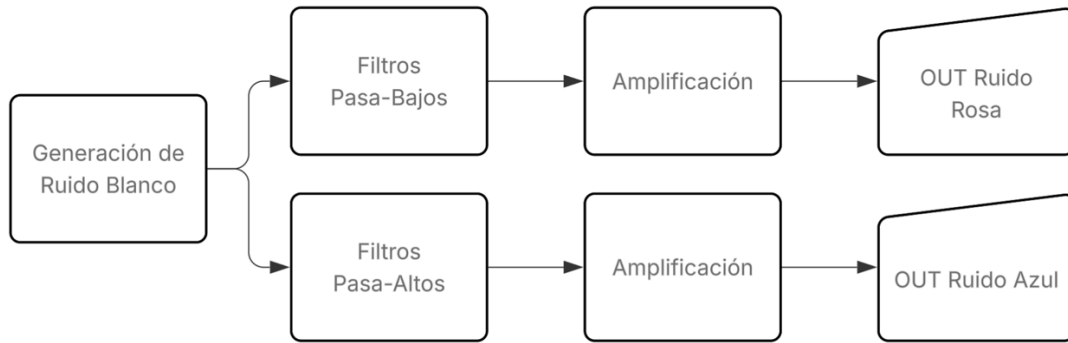


Figura 43. Diagrama de bloques noise

## 6.5. DAW

El objetivo del DAW (Digital Audio Workstation) es poder realizar la grabación, aplicación de efectos y exportación de audio en formato .WAV; Para esto hicimos uso de las siguientes librerías:

### 6.5.1. Librerías

- **Tkinter:** interfaz por defecto de Python para hacer uso de GUI TK. Esta librería proporciona amplias herramientas para crear interfaces gráficas multiplataforma.
- **Wave:** esta librería es la encargada de proporcionar la interfaz necesaria para leer y escribir archivos WAV. La característica principal es permitir la lectura y escritura de archivos PCM sin comprimir.
- **Pyaudio:** librería encargada de la interacción con dispositivos de audio a través de la biblioteca portaudio. Esto nos permite reproducir y grabar audio.
- **Numpy:** esta librería se utilizó para manipular los datos de audio capturados y poder dividirlos en arrays para su fácil manipulación.
- **Threading:** librería utilizada para dividir los procesos dentro del código.
- **Matplotlib:** librería encargada de realizar la visualización interactiva en Python.
- **Pedalboard:** esta librería es la encargada de agregar los efectos de audio.

### 6.5.2. Variables globales del programa

- **FORMAT:** ayuda a definir el formato en el que se guardan los datos de audio. Este modelo utiliza un ancho de 16 bits donde nos permite guardar una rando de datos entre -32768 y 32767
- **CHANNELS:** número de canales utilizados para la grabación, en este caso estamos utilizando solo un canal por lo que la grabación será mono.
- **RATE:** define la frecuencia de muestreo de la toma de datos, por lo que trabajaremos con 44,100 Hz ya que es un valor estándar.
- **CHUNK:** interfaz para leer archivos por trozos y está definido por el número de muestras de audio procesadas por cada bloque.
- **RECORD\_SECONDS:** tiempo máximo para realizar la grabación
- **Frames:** lista que almacena los datos de grabación
- **Original\_frames:** lista que guarda la grabación original para ver la diferencia al aplicar los efectos.
- **Stream:** se almacena el objeto de audio para que sea utilizado por PyAudio al comenzar la grabación.
- **Recording:** define el estado de la grabación
- **Playback\_thread:** proceso separado de la interfaz para que reproduzca el audio grabado.
- **Playing:** define el estado del audio grabado
- **Chorus\_effect:** este efecto crea una copia de la señal modificando frecuencia y tiempo de reproducción produciendo una sensación que hay más de un instrumento.
- **Reverb\_effect:** este efecto crea una sensación de grandeza y profundidad. Con el parámetro `room_size` modificamos el tamaño de grandeza y profundidad del efecto.
- **Delay\_effect:** este efecto crea una copia de los datos del audio y la reproduce un período de tiempo después. Con el parámetro `delay_seconds` definimos la duración del retardo y con el parámetro `feedback` la cantidad de señal que será alimentada a la entrada nuevamente.

### 6.5.3. Funciones del programa

A continuación se explican las distintas funciones del programa para poder realizar la grabación, aplicar efectos, reproducción y exportación del audio en formato WAV.

**Stream\_callback:** esta función es para que la librería PyAudio pueda seleccionar la fuente de audio que puede ser por medio del micrófono de la computadora o tarjeta de sonido, además guardará los datos en dos diferentes listas. La lista **frames** guardará los datos a los que se les agregan los efectos y la lista **original\_frames** guardará los datos originales sin efectos.

- **Toggle\_recording:** función que determina el estado del botón al momento de estar realizando la grabación.
- **Start\_recording:** empieza la grabación de audio con la información de FORMAT, RATE CHANNELS y CHUNK. Al realizar la grabación se desactivan los botones de play y save.
- **Stop\_recording:** detiene la grabación y los botones de play y save son activados.
- **Toggle\_effect:** esta función actualiza los botones para mostrar el estado de los efectos y así conocer que efecto está siendo aplicado a la grabación de audio.
- **Apply\_effects:** esta función aplica los efectos a los frames guardados con esta función `Apply_effects_to_frames`. Convierte los datos a un array tipo flotante y lo normaliza entre -1 y 1.
- **Apply\_chorus:** esta función aplica el efecto y actualiza los datos del audio ya con el efecto aplicado
- **Apply\_reverb:** esta función aplica el efecto y actualiza los datos del audio ya con el efecto aplicado
- **Apply\_delay:** esta función aplica el efecto y actualiza los datos del audio ya con el efecto aplicado
- **Save\_recording:** esta función es para poder guardar la grabación en formato WAV junto con la aplicación del efecto si así lo deseamos.
- **Play\_audio\_stream:** utiliza el hilo para reproducir la grabación y así no interferir con la interfaz gráfica.
- **Play\_recording:** permite la reproducción del audio grabado y al momento de aplicar los efectos también lo reproduce.
- **On\_closing:** función para terminar con el proceso del programa.

A continuación, se encuentra el código en Github: [https://github.com/Jeremy-Mejia/DAW\\_Tesis.git](https://github.com/Jeremy-Mejia/DAW_Tesis.git)

### 7.1. VCO

El oscilador es la parte principal del sintetizador, en este módulo pudimos generar dos tipos de onda, una onda sinusoidal y una onda cuadrada. La generación de la onda se da gracias al control de voltaje (CV), este voltaje es DC y es obtenido por la comunicación MIDI, este método de comunicación proporciona 1V/Oct, lo cual indica que conforme aumente el voltaje, también lo hará la frecuencia.

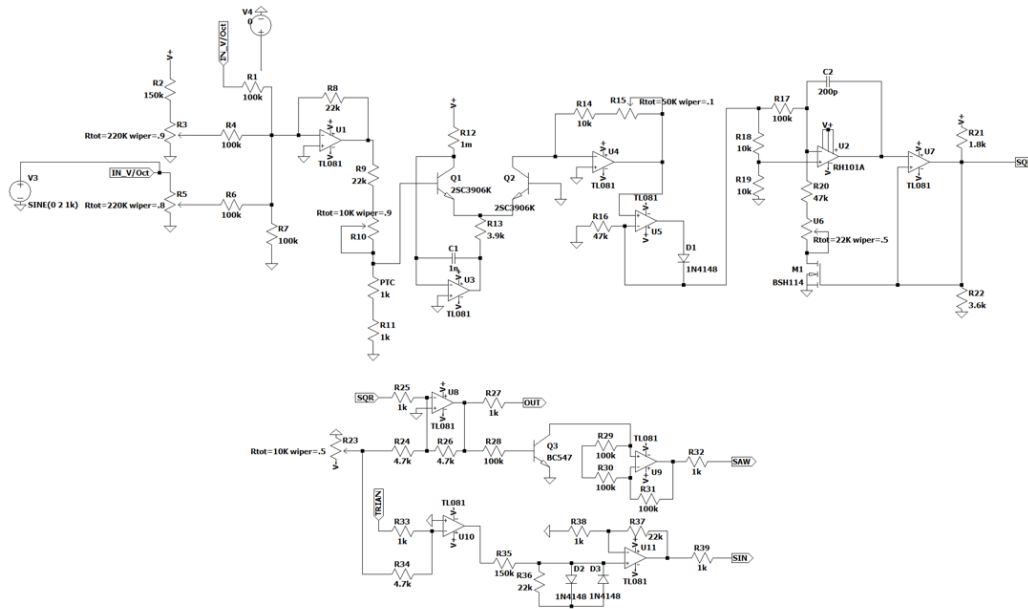


Figura 44. VCO circuito final

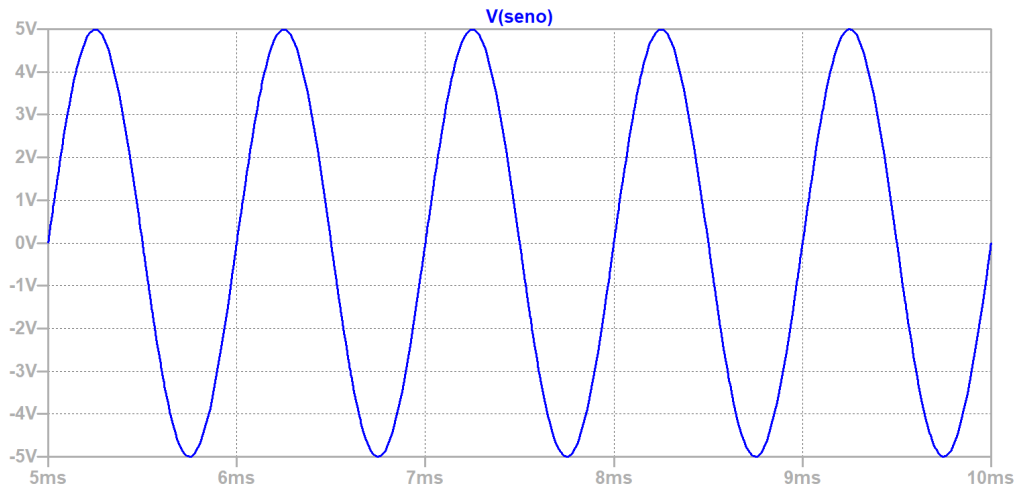


Figura 45. VCO onda sinusoidal simulación

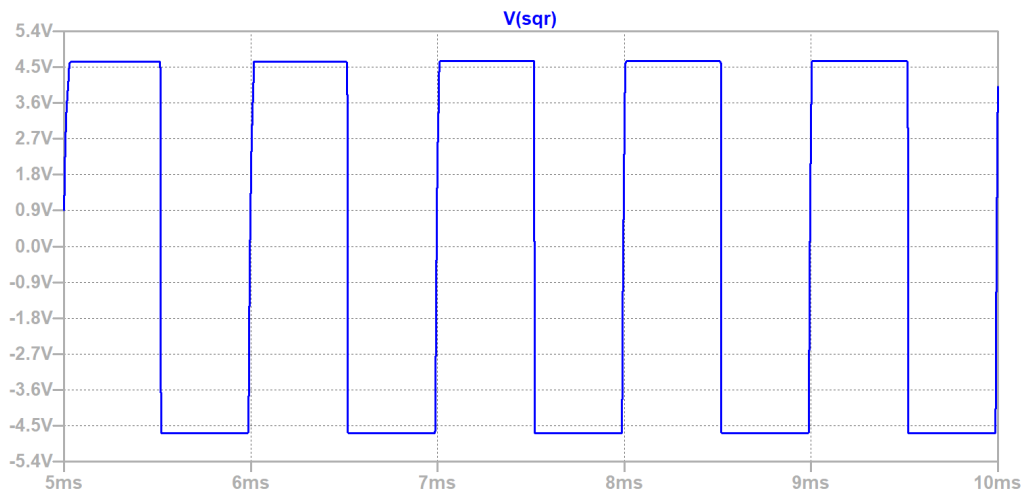


Figura 46. VCO onda cuadrada simulación

En las figuras 45 y 46 podemos observar las ondas a la salida

## 7.2. LFO

El oscilador de baja frecuencia es un modulador. Este LFO tiene un rango de frecuencia de 10Hz y 100Hz, su función es poder modular la onda portadora mediante la onda moduladora. Este módulo ayuda a obtener características únicas en la señal de salida, generando efectos sonoros.

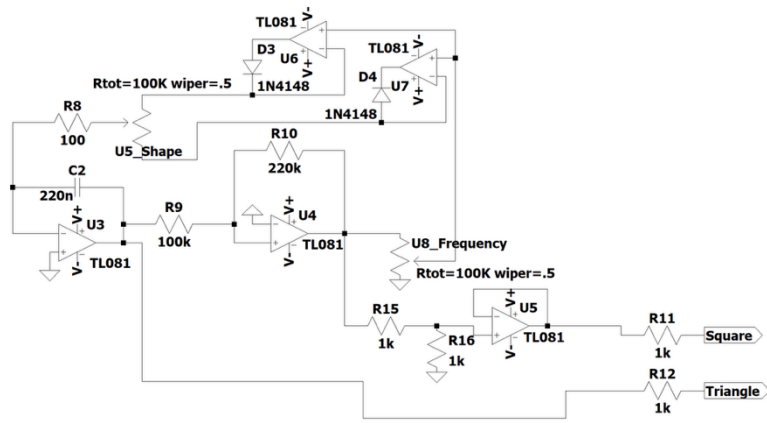


Figura 47. LFO circuito final



Figura 48. LFO onda triangular simulación

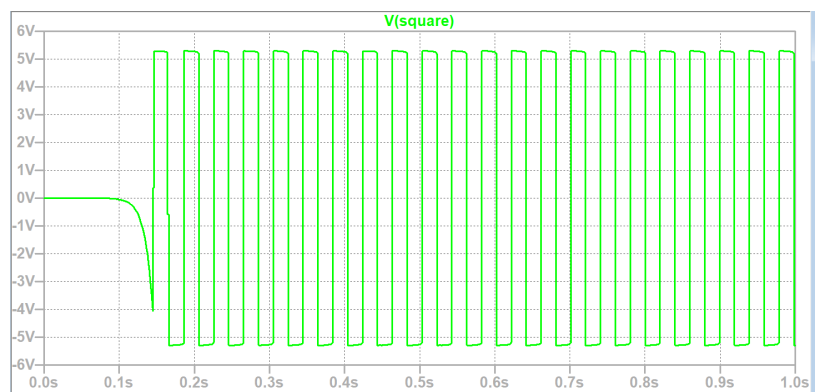


Figura 49. LFO onda cuadrada simulación

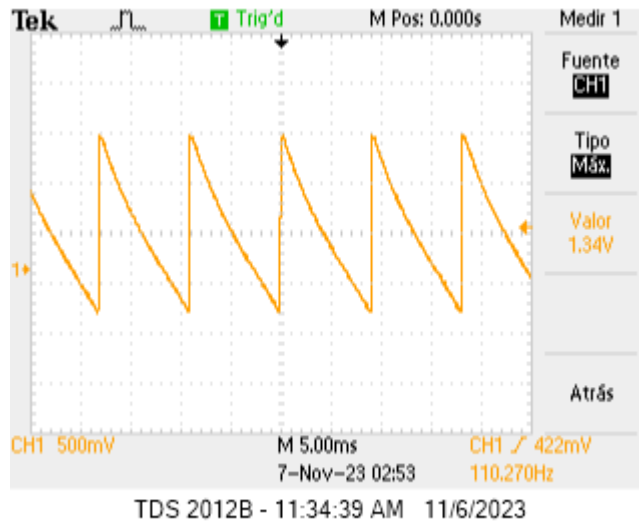


Figura 50. LFO onda triangular física

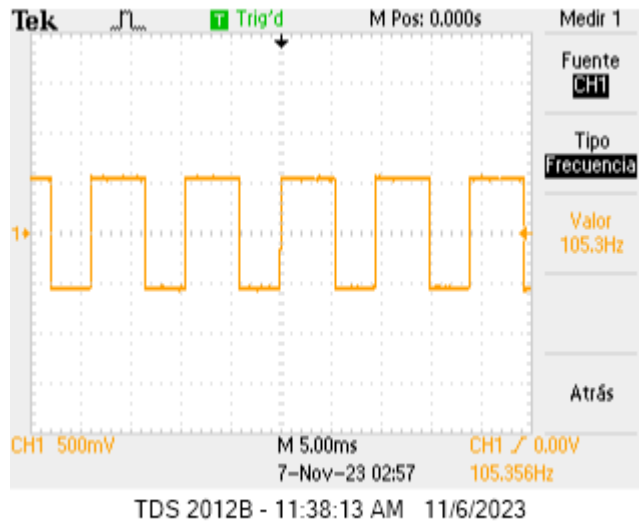


Figura 51. LFO onda cuadrada física

En la figura 48 y 49 podemos observar los resultados de las gráficas generadas en la simulación, y en la figura 50 y 51 las gráficas generadas por medio del circuito físico. Si evaluamos el comportamiento, nos damos cuenta de que sí cumple con la función principal de ser un LFO y funcionar como un módulo que modula en función de otra señal.

### 7.3. Mixer

El mixer es un módulo destinado a poder realizar suma de señales. En este caso tenemos 3 entradas, cada entrada tiene la capacidad de recibir voltajes de 10V pico-pico y obtener a la salida la sumatoria de las señales de entrada. En este módulo hicimos uso de amplificadores inversores para poder atenuar por completo la señal a la salida y en la etapa para realizar la sumatoria, colocamos un amplificador sumador inversor para devolver la fase de las señales.

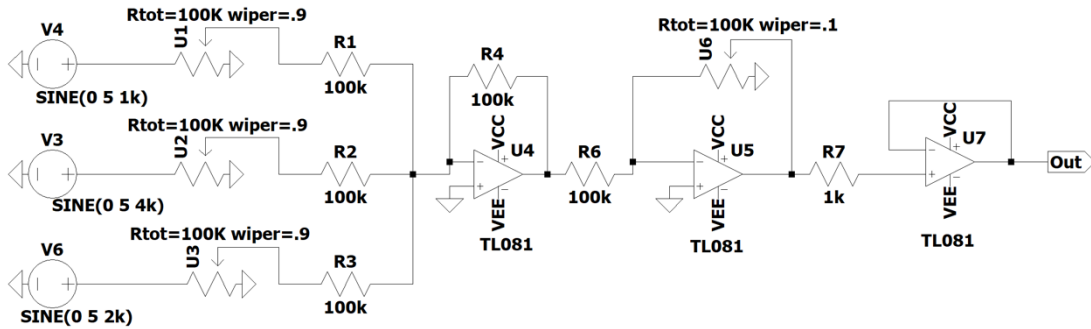


Figura 52. Circuito del mixer

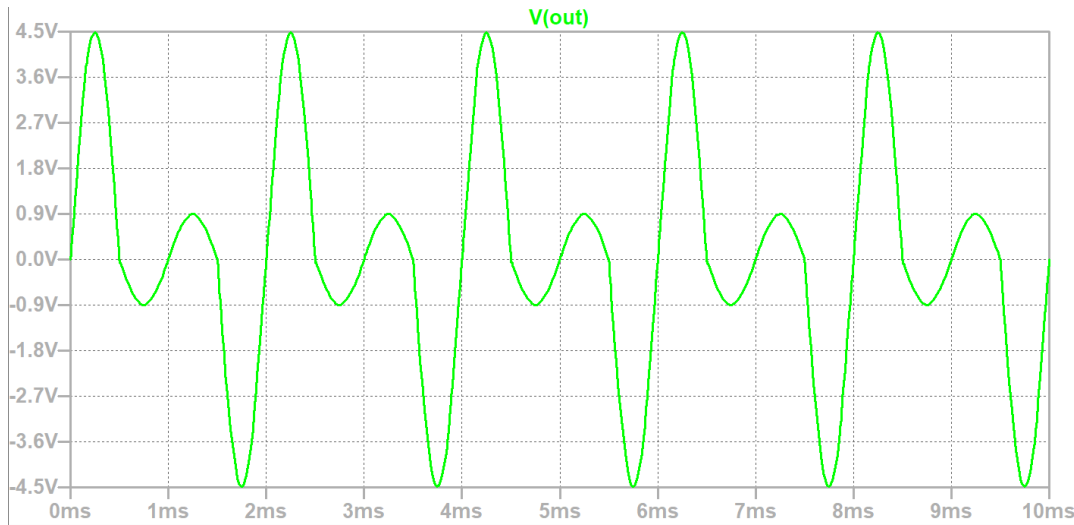


Figura 53. Simulación del mixer

En la Figura 53 podemos observar la señal a la salida del circuito simulado, si nos damos cuenta la sumatoria de las señales nos da una forma de onda y características distintas, esto es porque hay sumatoria de corriente, voltajes y frecuencia.

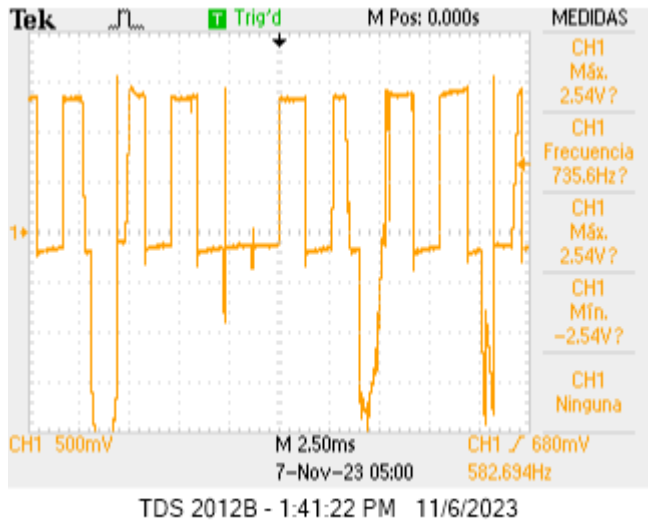


Figura 54. Salida física del mixer

En la Figura 54 podemos observar al mezclador de manera física, en este caso sumamos una señal cuadrada y una sinusoidal, y podemos observar que la forma de onda cambia donde es única por la frecuencia de cada señal de entrada.

## 7.4. Noise

El módulo de ruido es el encargado de agregar las variaciones de voltaje a la señal de entrada. Al tener nuestra salida del oscilador, es conectada a la entrada del módulo de ruido y lo que genera son variaciones de voltaje en el tiempo.

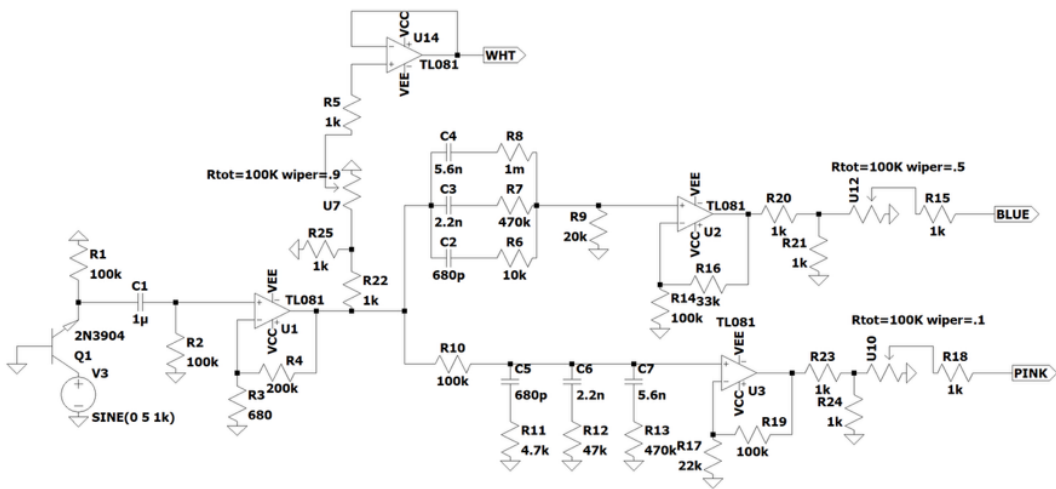


Figura 55. Circuito noise

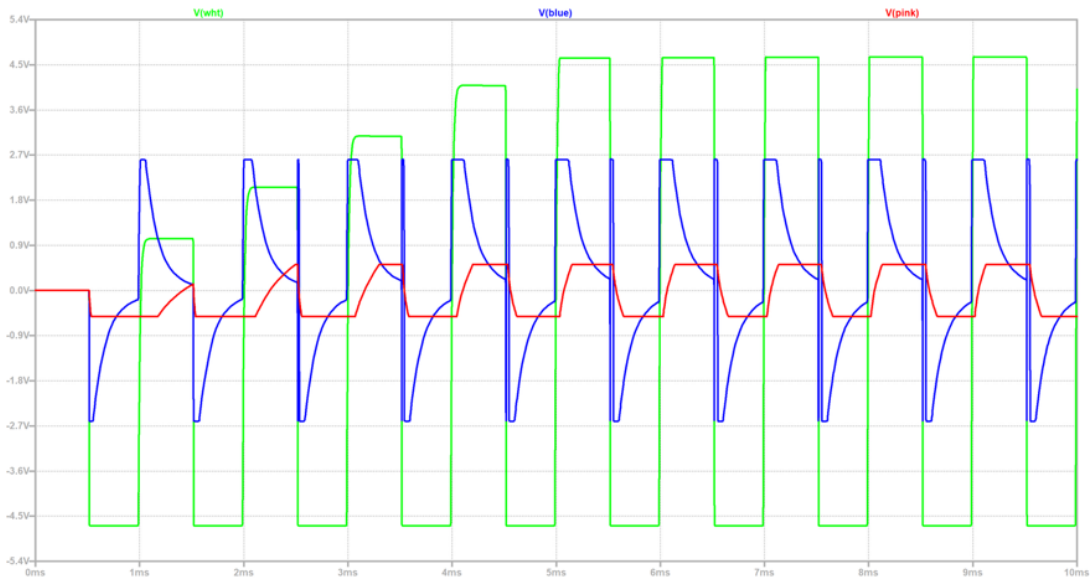


Figura 56. Simulación de noise

En la Figura 56 podemos observar la simulación del módulo de ruido. En este caso tenemos a la entrada una onda sinusoidal. Para la salida del ruido blanco, lo que sucede es que produce una saturación y agrega armónicos a la señal de entrada. Para la salida del ruido rosa, lo que sucede es que utilizamos filtros pasa bajos y la forma de onda difiere. Así mismo a la salida del ruido azul tenemos filtros pasa altos por lo que la forma de onda también cambia. Este módulo es apreciado con mayor exactitud al momento de escuchar el funcionamiento del módulo.

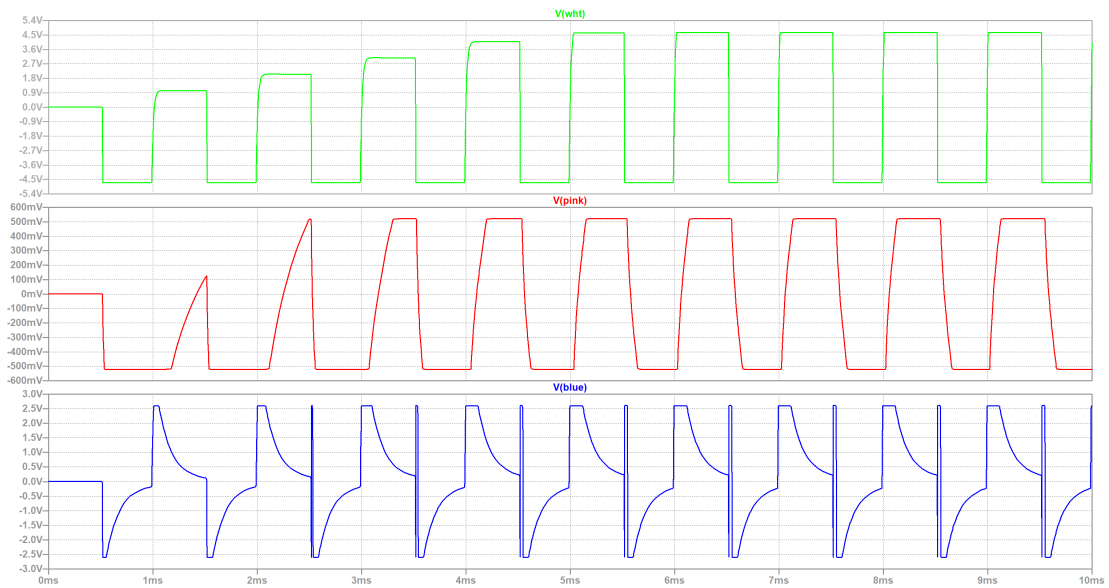


Figura 57. Simulación ondas separadas

## 7.5. DAW

El DAW es un programa para realizar la grabación, aplicación de efecto reproducción y exportación de audio. Para esto hicimos uso de Python y nos apoyamos de algunas librerías para llegar a cumplir con los requerimientos.

En la Figura 58 se muestra la interfaz del programa para realizar la grabación, aplicación de efectos, reproducción y exportación del audio en formato WAV.

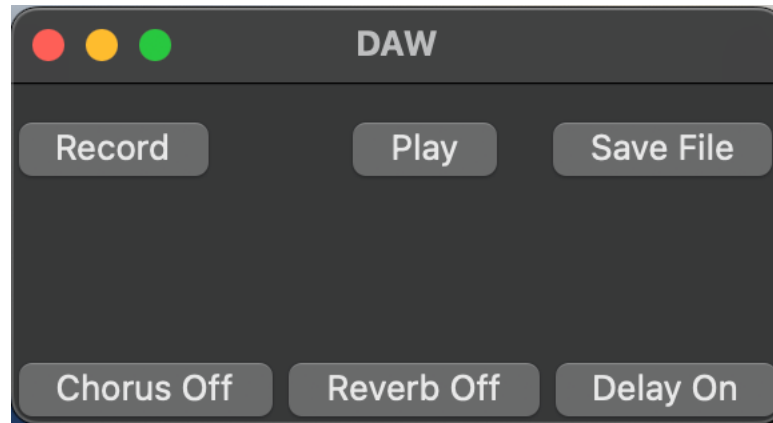


Figura 58. Interfaz del DAW

- Las ondas generadas por el oscilador controlado por voltaje producen los armónicos en su frecuencia correcta, esto significa que la forma de onda que tenemos a la salida está completa y cumple con sus características frecuenciales.
- El oscilador de baja frecuencia tiene un rango de frecuencia de 10Hz a 100Hz, esto nos indica que las modulaciones que se realizarán a partir de él estarán dentro del rango propuesto para ser un LFO. La figura 50 y 51 nos muestra que las señales moduladoras cumplen con los requerimientos necesarios para modificar a la onda portadora.
- El mezclador realiza una sumatoria de corrientes, en donde se desea atenuar por completo su sonoridad, para esto fue necesario hacer uso de amplificadores en retroalimentación negativa en el amplificador sumador, luego a la siguiente etapa fue necesario colocar un amplificador inversor para que la suma de las señales pudiera estar en fase en relación con las señales de entrada.
- El programa permite realizar la grabación, aplicar de efectos, reproducción y exportación del audio en formato WAV.

- Se recomienda que, al realizar el análisis del circuito de manera física, utilizar placas perforadas para disminuir el nivel de ruido. Para esto es necesario contar con buenas herramientas como el cautín, una base para colocar las placas, lentes de protección y por último un ventilador para extraer el humo del estaño, ya que es dañino.
- Se recomienda agregar una entrada adicional al mezclador para tener la posibilidad de sumar 3 ondas comerciales y adicional algún filtro VCF o VCA. Esto permitirá obtener más combinaciones de sonidos a la salida.
- Se recomienda hacer PCB para ahorrar tiempo al momento de soldar en las placas perforadas, ya que es necesario trazar los tracks con estaño, lo cual implica mayor tiempo y consumo de recursos. Adicional, al realizar las placas perforadas, el ruido que pueda ser generado es mucho menor, lo cual es de gran importancia para un proyecto de audio.

- 130 años de música electrónica. (2023). *Universidad de Valladolid* [https://www.lpi.tel.uva.es/~nacho/docencia/ing\\_ond\\_1/trabajos\\_04\\_05/io3/public\\_html/historia.html](https://www.lpi.tel.uva.es/~nacho/docencia/ing_ond_1/trabajos_04_05/io3/public_html/historia.html)
- Plaza, Esteban. (n.d.). *Teorema de Fourier: Matemáticas de la música*. <http://lcr.uns.edu.ar/fvc/NotasDeAplicacion/FVC-EstebanPlaza.pdf>
- Cervantes, Gonzalo. (n.d.). *Diseño e Implementación de un Sintetizador Analógico Modular*. Universidad Politécnica de Madrid. 180 págs.
- Innovasonora. (2023). *LFO (Low Frequency Oscillation)* <https://www.ucm.es/innovasonora/lfo>
- Valenzuela, Manuel. (2019). *Desarrollo e Implementación de un Sintetizador Digital de Audio Empleando Metodologías Aditivas y Sustractivas*. Universidad del Valle de Guatemala. 94 págs.
- Juárez, Muricio; M. Diego y S. Cesar. (2015). *Diseño e Implementación de un sintetizador Analógico, Utilizando Amplificadores Operacionales*. Instituto Politécnico Nacional. México, D.F. 132 págs.
- Musicians Institute Hollywood. (n.d.). *The origins of the synthesizer*. Musicians Institute. <https://www.mi.edu/in-the-know/the-origins-of-the-synthesizer/>
- Reinoso, D; Di, J. (n.d.). *La síntesis de sonido*. [http://sedici.unlp.edu.ar/bitstream/handle/10915/38382/Documento\\_completo.pdf?sequence=1](http://sedici.unlp.edu.ar/bitstream/handle/10915/38382/Documento_completo.pdf?sequence=1)
- Córdova, Rony. (2019). *Diseño y Desarrollo de un Sintetizador de Sonido de Software*. Pontificia Universidad Católica del Ecuador. 132 págs.
- Ingeniatic. (n.d.). *Sintetizador de sonido*. <https://www.etsist.upm.es/estaticos/ingeniatic/index.php/tecnologias/item/590-sintetizador-de-sonido%3Ftmpl=component&print=1.html#:~:text=El%20primer%20sintetizador%20apareci%C3%B3%20en,a%20ser%20un%20instrumento%20musical>
- Apple Support. (n.d.). *Sintetizadores digitales*. <https://support.apple.com/es-mx/guide/mainstage/lgsife419f90/mac#:~:text=El%20Synclavier%2C%20sacado%20al%20mercado,generaci%C3%B3n%20de%20sonido%20completamente%20digital>



Figura 59. Panel frontal VCO

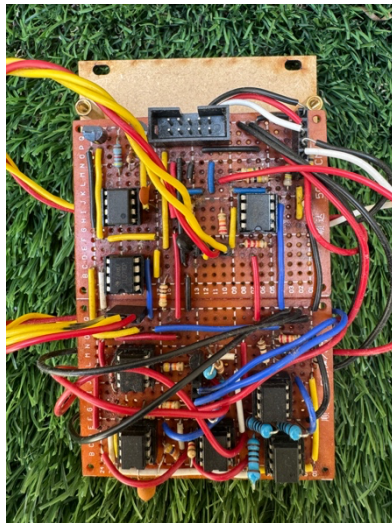


Figura 60. Panel trasero VCO



Figura 61. Panel frontal mixer

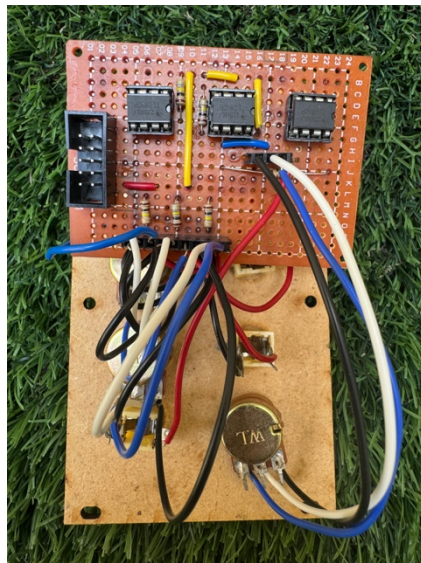


Figura 62. Panel trasero mixer



Figura 63. Panel frontal LFO

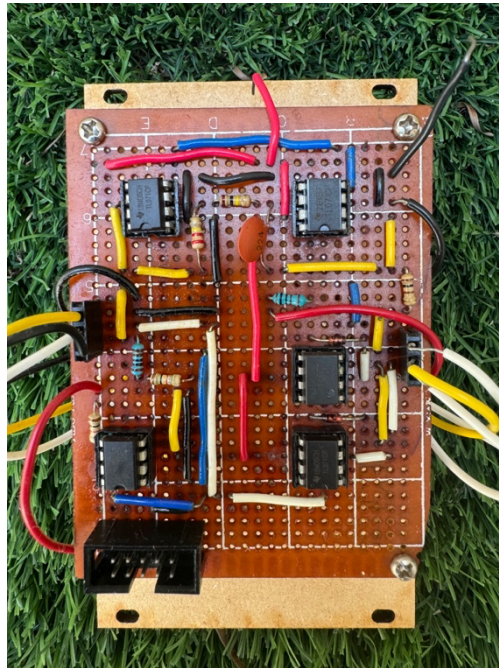


Figura 64. Panel trasero LFO



Figura 65. Panel frontal noise

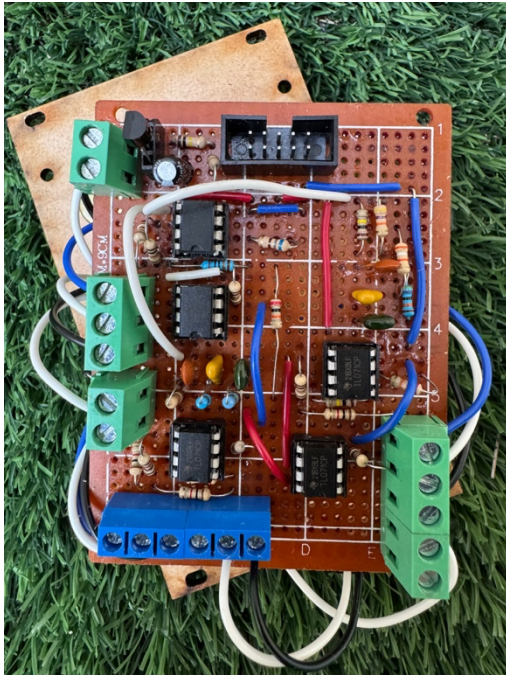


Figura 66. Panel trasero noise