
Actualización de sintetizador analógico modular y diseño de módulo para memoria de configuraciones de usuario

Andy Javier Bonilla Silva



UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA
Facultad de Ingeniería




**Actualización de sintetizador analógico modular y diseño de
módulo para memoria de configuraciones de usuario**

Trabajo de graduación presentado por Andy Javier Bonilla Silva para
optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería Electrónica


Guatemala,

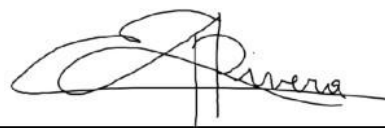
2025

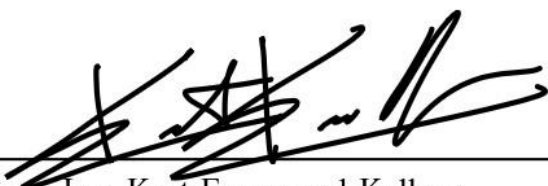
Vo.Bo.:

(f) 
M. Sc. Carlos Esquit

Tribunal Examinador:

(f) 
M.Sc. Carlos Esquit

(f) 
Dr. Luis Alberto Rivera Estrada

(f) 
Ing. Kurt Emmanuel Kellner

Fecha de aprobación: Guatemala, 13 de febrero de 2025.

Desde que tengo memoria, siempre he mantenido una profunda pasión por el conocimiento, en específico, en aquellos temas que despiertan más mi interés, siendo esto desde ciencias exactas hasta las áreas artísticas, todo esto con el objetivo de poder entender el funcionamiento de las cosas que me rodean. Gracias a esta búsqueda constante de aprendizajes es que me ha permitido estar acá redactando el presente proyecto de graduación.

Esta aventura universitaria comenzó en el 2019 siendo estudiante de Ingeniería en Tecnología de Audio, donde mi objetivo era diseñar y construir dispositivos para el procesamiento de señales acústicas convertidas en señales eléctricas. Sin embargo, tras una profunda reflexión introspectiva, así como mi pasión por los desafíos, decidí embarcarme en un reto aún mayor: la Ingeniería Electrónica. Una disciplina que junta a las matemáticas y la física para construir las bases de las tecnologías que impulsan la actualidad; un viaje que tras múltiples esfuerzos, desvelos y una gran dosis de resiliencia, llega a su fin.

Este camino no lo he recorrido solo, y aunque el esfuerzo personal ha sido fundamental, también he contado con el apoyo incondicional. En primer lugar a mi familia, a mi papá Juan Pablo, quien me ha motivado a nunca darme por vencido, a mi mamá, Sary, quien me enseñó a ser apasionado por lo que uno hace y a mis hermanos, Juanpa y Elliott, por abrir esa brecha de vivencias en el camino de la vida. En segundo lugar, a mi novia, Mar, quien me ha acompañado en mis desvelos y frustraciones, que, con paciencia y comprensión, me ofreció su amor y aliento en los momentos con mayor estrés y dificultad; realmente no tengo palabras que puedan describir su presencia constante, su cariño y su fe en mí. También a mi primo, Marcos, que con su apoyo constante y consejos en este viaje han sido invaluable en mi vida personal y profesional. De igual forma, quiero agradecer a mis amigos y colegas, Gaby, Cliff, Chori, Cuellar y Gil, con los que vivimos innumerables desvelos, aprendizajes y mucho apoyo. También agradezco a las amistades de distintas carreras que conocí a lo largo de este viaje, Xime, Jamiel, Sofí, Guayo, Andréé, Héctor, Jeremy, Marre, Sophie y Alan; con quienes compartí apoyo y perspectivas que me han ayudado a ampliar mis horizontes y a enriquecer esta experiencia de formas inesperadas. Por supuesto, no puedo dejar de mencionar a mis amigos de toda la vida Diana, Josué, Chepe y Gaby, que me han acompañado desde los días de colegio, cuyo respaldo incondicional ha sido un pilar constante en cada etapa de mi vida.

También quiero expresar mi más sincero agradecimiento a los profesores que me han guiado a lo largo de estos años. Su dedicación, conocimiento y compromiso no solo me han brindado las herramientas necesarias para avanzar en mi carrera, sino que también me han inspirado a superar mis propios límites. Específicamente a Pablo Mazariegos, Pablo Oliva, Gabriel Barrientos y Estuardo Mancio, ya que cada consejo y cada reto académico que me plantearon fueron fundamentales para mi crecimiento profesional y personal. De igual forma, a Christopher, Luis David, Madahí y Raquel por el gran apoyo que me brindaron.

Finalmente, quiero agradecer a mis compañeros y amigos de BAM, quienes han sido un apoyo invaluable durante todo este proceso. Su compañerismo, comprensión y disposición para ayudarme, incluso en los momentos más desafiantes, me han permitido encontrar un equilibrio entre mis responsabilidades y mis metas académicas. Agradezco las conversaciones motivadoras, los consejos sinceros y el respaldo incondicional que me brindaron, siempre dispuestos a ofrecer una mano amiga.

Prefacio	IV
Lista de figuras	X
Lista de cuadros	XI
Resumen	XII
Abstract	XIII
1. Introducción	1
2. Antecedentes	2
2.1. Sintetizador modular	2
2.2. Electrónica analógica y de potencia	3
2.3. Diseño y fabricación de placas de circuito impreso (PCB)	4
2.4. Implementación de sintetizador en proyectos anteriores	5
2.5. Desarrollo de proyectos similares	6
3. Justificación	9
4. Objetivos	11
4.1. Objetivo general	11
4.2. Objetivos específicos	11
5. Alcance	12
6. Marco teórico	13
6.1. Historia de los sinterizadores	13
6.2. Sinterizadores digitales y analógicos	15
6.3. Sistema Eurorack	16
6.4. Oscilador controlado por voltaje (VCO)	17
6.5. Amplificador controlado por voltaje (VCA)	17
6.6. Generador envolvente	18

6.7. Teoría de circuitos para sintetizador modular	18
6.7.1. Schmitt Trigger	19
6.7.2. Amplificador diferencial de transistores	20
6.7.3. Amplificador clase AB	21
6.8. Procesamiento de señales	23
6.9. Sistema de control clásico	25
6.10. Controlador PID	27
6.10.1. Controlador PID continuo	27
6.10.2. Controlador PID digital	28
6.11. Fuentes de alimentación	31
6.11.1. Fuentes lineales	31
6.11.2. Fuentes conmutadas	31
6.12. Convertidores tipo Buck	31
7. Metodología	34
8. Fuente de alimentación	36
8.1. Simulación en LTspice	36
8.2. Diseño del circuito en EasyEDA	38
8.3. Diseño y fabricación de PCB	38
8.4. Resultados	39
8.5. Discusión de resultados	41
9. Módulo oscilador controlado por voltaje (VCO)	42
9.1. Simulación en LTspice	42
9.2. Diseño del circuito en EasyEDA	43
9.3. Diseño y fabricación de PCB	44
9.4. Resultados	46
9.5. Discusión de resultados	47
10. Módulo amplificador controlado por voltaje (VCA)	48
10.1. Simulación en LTspice	48
10.2. Diseño del circuito en EasyEDA	49
10.3. Diseño y fabricación de PCB	50
10.4. Resultados	51
10.5. Discusión de resultados	53
11. Módulo generador envolvente (EG)	54
11.1. Simulación en LTspice	54
11.2. Diseño del circuito en EasyEDA	55
11.3. Diseño y fabricación de PCB	56
11.4. Resultados	57
11.5. Discusión de resultados	58
12. Módulo de salida	59
12.1. Simulación en LTspice	59
12.2. Diseño y fabricación de PCB	60
12.3. Funcionamiento	61
12.4. Discusión de resultados	63

13. Módulo de memoria de configuraciones	64
13.1. Simulación en LTspice	65
13.1.1. Simulación de filtro controlado por voltaje (VCF)	65
13.1.2. Simulación de PID	66
13.2. Diseño del circuito en EasyEDA	67
13.2.1. Filtro controlado por voltaje (VCF)	67
13.2.2. Etapa de acondicionamiento de señal para PID	68
13.3. Diseño y fabricación de PCB	69
13.4. Resultados	70
13.4.1. Filtro controlado por voltaje (VCF)	70
13.4.2. Funcionamiento de PID	71
13.5. Discusión de resultados	74
14. Carcasa	75
14.1. Abstracción de diseño	75
14.2. Mejoras al diseño	76
14.3. Diseño de paneles frontales	77
14.3.1. Módulo oscilador controlado por voltaje (VCO)	78
14.3.2. Módulo amplificador controlado por voltaje (VCA)	78
14.3.3. Módulo generador envolvente (EG)	79
14.3.4. Módulo de salida	79
14.3.5. Módulo memoria de configuraciones	80
14.4. Producto final	80
15. Conclusiones	82
16. Recomendaciones	83
17. Bibliografía	84
18. Anexos	87
18.1. Fuente de alimentación	87
18.2. Módulo oscilador controlado por voltaje	88
18.3. Módulo amplificador controlado por voltaje	88
18.4. Módulo generador envolvente	89
18.5. Módulo de salida	90
18.6. Módulo de memoria de configuraciones	91
19. Glosario	93

Lista de figuras

1. Ejemplo de sintetizador [1]	2
2. Interfaz de LTSpice	4
3. Interfaz de Altium Designer	5
4. Sintetizador realizado	6
5. Módulo VCO [5]	6
6. Sintetizador digital [6]	7
7. Emulación digital de pedal [7]	8
8. Robert Moog [10]	14
9. Donald Buchla [11]	14
10. Sintetizador modular analógico [13]	15
11. Sintetizador digital [15]	15
12. Ejemplo de sintetizador con estándar Eurorack [16]	16
13. Diagrama de módulos Eurorack [17]	16
14. Funcionamiento de VCO [18]	17
15. Tipos de onda producidas por oscilador [20]	17
16. Diagramas de bloques de módulo VCA [22]	18
17. Diagrama de envolvente [24]	18
18. Circuito Schmitt Trigger	19
19. Circuito amplificador diferencial	20
20. Circuito amplificador clase AB	22
21. Funcionamiento de micrófono [29]	24
22. Procesamiento de señales [31]	24
23. Parámetros de control [33]	27
24. Controlador PID [34]	28
25. Controlador PID digital [35]	30
26. Diagrama de fuente lineal [37]	31
27. Diagrama de fuente conmutada [37]	32
28. Diagrama de fuente conmutada [39]	32
29. Diagrama de Bode de un convertidor tipo Buck [40]	33
30. Esquemático fuente de alimentación	36
31. Análisis transitorio de fuente de alimentación	37

32. Análisis de Fourier de fuente de alimentación	37
33. Esquemático VCO en EasyEDA	38
34. Vista 2D de PCB de la fuente de alimentación	38
35. Vista 3D de PCB fuente de alimentación	39
36. PCB físico ensamblado de fuente de alimentación	39
37. Análisis transitorio de fuente de alimentación	40
38. Análisis de Fourier de riel 12V	40
39. Análisis de Fourier de riel -12V	41
40. Topología oscilador controlador por voltaje	42
41. Salida simulada de diente de sierra	43
42. Salida simulada de PWM	43
43. Esquemático VCO en EasyEDA	44
44. Vista 2D de PCB oscilador controlador por voltaje	44
45. Vista 3D de PCB oscilador controlador por voltaje	45
46. PCB físico ensamblado de VCO	46
47. Medición en osciloscopio de salida de placa de oscilador controlador por voltaje	46
48. Topología amplificador controlador por voltaje	48
49. Señales simuladas de entrada a VCA	49
50. Señal simulada de salida de VCA	49
51. Esquemático VCA en EasyEDA	50
52. Vista 2D de PCB amplificador controlador por voltaje	50
53. Vista 3D de PCB amplificador controlador por voltaje	51
54. PCB físico ensamblado de VCA	51
55. Medición en osciloscopio de las entradas de placa de amplificador controlador por voltaje	52
56. Entrada de placa de amplificador controlador por voltaje	52
57. Topología generador envolvente	54
58. Salida simulada de generador envolvente	55
59. Esquemático EG en EasyEDA	55
60. Vista 2D de PCB generador envolvente	56
61. Vista 3D de PCB generador envolvente	56
62. PCB físico ensamblado de EG	57
63. Medición en osciloscopio de la entrada de placa de generador envolvente (EG)	57
64. Medición en osciloscopio de la salida de placa de generador envolvente (EG)	58
65. Topología etapa de salida y paneo	59
66. Salida simulada de diente de sierra	60
67. Vista 2D de PCB salida	60
68. Vista 3D de PCB salida	61
69. PCB físico ensamblado de salida	61
70. Medición en osciloscopio de las entradas de placa de módulo de salida	62
71. Medición en osciloscopio de las salidas de placa de módulo de salida	62
72. Diagrama de bloques para inserción de configuraciones	64
73. Diagrama de bloques para inserción de configuraciones	65
74. Topología filtro controlado por voltaje	65

75. Superposición de entrada y salida en filtro controlado por voltaje	66
76. Topología en etapa de acondicionamiento	67
77. Superposición de entrada y salida en etapa de acondicionamiento	67
78. Topología filtro controlado por voltaje	68
79. Topología en etapa de acondicionamiento	68
80. Vista 2D de PCB filtro controlado por voltaje	69
81. Vista 3D de PCB filtro controlado por voltaje	69
82. PCB físico ensamblado de memoria de configuraciones	70
83. Medición en osciloscopio de entrada y salida de etapa de filtro controlado por voltaje (VCF)	70
84. Medición en osciloscopio de acondicionamiento de señal de control	74
85. Diseño de carcasa Eurorack [46]	75
86. Impresión final de marco de carcasa	76
87. Perfil de aluminio implementado [46]	76
88. Captura de panel frontal Salida para corte láser	77
89. Captura de panel frontal VCO para corte láser	78
90. Captura de panel frontal VCA para corte láser	78
91. Captura de panel frontal EG para corte láser	79
92. Captura de panel frontal salida para corte láser	79
93. Captura de panel frontal VCF para corte láser	80
94. Carcasa final implementada	81
95. Fuente de alimentación	87
96. Módulo oscilador controlado por voltaje	88
97. Vista varia módulo VCA	88
98. Vista varia módulo VCA	89
99. Vista varia módulo EG	89
100. Vista varia módulo EG	90
101. Vista varia módulo salida	90
102. Vista varia módulo Salida	91
103. Vista varia módulo memoria de configuraciones	91
104. Vista varia módulo memoria de configuraciones	92

El presente trabajo de graduación se enfocó en la actualización y rediseño de un sintetizador analógico modular, en el cual se integró un nuevo módulo con el objetivo de que las configuraciones personalizadas del usuario pudieran ser guardadas. En primer lugar, se realizó una fase de simulación y creación de prototipos, utilizando herramientas avanzadas como el software LTSpice para que los circuitos teóricos fueran modelados y refinados antes de su implementación física. Además, se llevó a cabo una meticulosa selección de componentes para garantizar no solo la calidad y compatibilidad, sino también el cumplimiento de las restricciones presupuestarias del proyecto. Posteriormente, se procedió con el diseño y la fabricación de placas de circuito impreso (PCB), apoyándose en corporaciones especializadas como JLCPCB, con el fin de obtener resultados óptimos y profesionales. Finalmente, se elaboró una carcasa para el sintetizador, brindando una protección sólida y una presentación estética que reflejara tanto la complejidad técnica como el potencial creativo del instrumento.

Este proyecto fue diseñado no solo para actualizar un sintetizador modular, sino también para dar respuesta a la creciente demanda de preservación de sistemas meramente analógicos en el ámbito musical. Además, se integraron componentes de vanguardia mediante el uso de semiconductores modernos. Por último, el sintetizador modular analógico fue concebido como una herramienta de aprendizaje en la síntesis de audio y una oportunidad para explorar la creatividad dentro de la ingeniería electrónica enfocada en la tecnología de audio.

En cuanto a los resultados obtenidos en las simulaciones y en las pruebas de las placas físicas, a pesar de haberse mostrado un alto grado de fidelidad en LTSpice, las no linealidades y tolerancias de los componentes reales causaron variaciones en las mediciones, sin comprometer el rendimiento del sintetizador.

Finalmente, se propuso una serie de recomendaciones para futuros desarrollos, como el enriquecimiento del sintetizador modular mediante la continua adición de módulos. Además, para los circuitos destinados a almacenar configuraciones de usuario, se sugirió la implementación de soluciones digitales para minimizar posibles errores y reprocesos asociados con los circuitos analógicos. También se recomendó mejorar la eficiencia en el manejo de memoria para el almacenamiento de múltiples configuraciones. Finalmente, se aconsejó que el marco de la carcasa fuera fabricado en una sola pieza para aumentar su rigidez.

This graduation project focused on the updating and redesign of a modular analog synthesizer, in which a new module was integrated to allow user-customized settings to be saved. First, a phase of simulation and prototyping was carried out, using advanced tools like LTSpice to model and refine theoretical circuits before their physical implementation. Additionally, a careful selection of components was made to ensure quality, compatibility, and adherence to the project's budget constraints. Then, the design and manufacturing of printed circuit boards (PCBs) was done, with support from specialized companies like JLCPCB, to achieve optimal and professional results. Finally, a case was built for the synthesizer, providing solid protection and an aesthetic presentation that reflects both the technical complexity and the creative potential of the instrument.

This project was designed not only to update a modular synthesizer but also to respond to the growing demand to preserve purely analog systems in the musical field. In addition, cutting-edge components were integrated using modern semiconductors. Lastly, the modular analog synthesizer was intended to serve as a learning tool in audio synthesis and as a way to explore creativity within electronic engineering focused on audio technology.

Regarding the results obtained in simulations and physical board testing, despite showing a high degree of accuracy in LTSpice, the non-linearities and tolerances of real components caused some variations in measurements, without affecting the synthesizer's performance.

Finally, a series of recommendations were proposed for future developments, such as enhancing the modular synthesizer by continually adding new modules. Additionally, for circuits aimed at storing user configurations, it was suggested to implement digital solutions to minimize possible errors and rework associated with analog circuits. Improving memory management efficiency for storing multiple configurations was also recommended. Lastly, it was advised that the case frame be manufactured in a single piece to increase rigidity.

CAPÍTULO 1

Introducción

El presente proyecto se enfoca en la actualización de un sintetizador analógico modular, así como en el diseño de un módulo para almacenar configuraciones personalizadas del usuario.

Como primera parte, se introduce al lector en los conceptos teóricos sobre la síntesis de audio, los circuitos adicionales a los convencionales, los sistemas de control, las herramientas digitales para la memoria de configuraciones y la introducción de convertidores DC-DC y fuentes de alimentación.

Seguidamente, se presenta una serie de capítulos organizados de tal forma que muestran el proceso de construcción del proyecto, el cual se divide en: simulación en LTspice para validar el funcionamiento de los módulos, diseño de circuitos en EasyEDA para seleccionar los componentes adecuados, diseño y fabricación de PCBs para los módulos, validación del funcionamiento de los módulos físicos y, por último, la discusión de los resultados obtenidos en comparación con los simulados.

Por otro lado, para el módulo de memoria de configuraciones se procedió a dividirlo en simulación de los circuitos analógicos necesarios para la implementación del sistema, elaboración de circuitos en EasyEDA para seleccionar los componentes adecuados, diseño y fabricación de PCB del módulo, validación del funcionamiento de los módulos físicos y la discusión de los resultados obtenidos frente a los simulados.

Asimismo, se elaboró una nueva carcasa para el sintetizador modular, la cual no solo protege los componentes electrónicos, sino que también proporciona un frente estético que refleja la complejidad técnica. Esta parte se divide en una abstracción del diseño, mejoras significativas al producto, elaboración de paneles frontales para cada uno de los módulos y, por último, se muestra el producto final.

Finalmente, se presentan los capítulos de conclusiones y recomendaciones, de acuerdo con los resultados y aprendizajes obtenidos durante el desarrollo de este proyecto.

2.1. Sintetizador modular

Este tipo de dispositivos electrónicos consta de una serie de módulos individuales que tienen funciones específicas, enfocándose a la síntesis de audio; lo que hace a estos sintetizadores modulares únicos, es que estos módulos individuales se pueden intercambiar de varias maneras a gusto del usuario, permitiendo una flexibilidad total en la creación y manipulación de sonidos a partir de la electricidad. Cada usuario puede crear conexiones complejas entre módulos utilizando cables de 3 mm, permitiendo diseñar propias rutas de señal y experimentar con una amplia gama de posibilidades sonoras [1]. Nótese en Figura 1.



Figura 1: Ejemplo de sintetizador [1]

La naturaleza única de esta serie de módulos los hace extremadamente versátiles y convenientes para una variedad de aplicaciones, desde producción musical hasta experimentación de sonido y síntesis de audio para múltiples aplicaciones como el cine o videojuegos. Sin embargo, estos pueden provocar confusiones en los usuarios, ya que son complejos de entender y de operar para principiantes debido a la cantidad de opciones y configuraciones disponibles en sus muchos módulos [1]. A continuación se muestran cinco de los muchos posibles módulos

que son implementables:

- **Fuente de alimentación:** es un dispositivo que convierte la energía eléctrica de una forma a otra, generalmente de AC a DC, para proporcionar el voltaje y corriente necesarios a los dispositivos electrónicos, en este caso los distintos módulos del sinterizador.
- **Oscilador controlado por voltaje (VCO):** este módulo genera señales de audio que determinan el tono y el carácter fundamental del sonido. Puede producir formas de onda básicas como ondas sinusoidales, cuadradas, triangulares o en dientes de sierra, así como formas de onda más complejas.
- **Amplificador controlado por voltaje (VCA):** este es un módulo que es capaz de ajustar la amplitud de una señal en respuesta a un voltaje de control (CV), usualmente utilizado en el procesamiento de audio y sintetizadores para cambiar dinámicamente el volumen de las señales de audio, pudiendo mantener un control preciso de la ganancia, lo que permite efectos como la modulación de amplitud (AM) y el control automático de la ganancia.
- **Generador envolvente:** este sistema posee las capacidades para controlar el cambio de características de la señal eléctrica en el tiempo. Usualmente enfocándose en 4 puntos: "Attack", "Decay", "Sustain"; todos estos parámetros controlados mediante un voltaje de threshold que activa el sistema y sus efectos consecuentes.
- **Amplificador de salida:** este módulo es el responsable de aumentar la acoplar las señales de audio, haciéndolas lo suficientemente fuertes como para accionar altavoces o auriculares, según sea la impedancia de estos, así como la corriente que estos pueden soportar. Es un componente esencial en los sistemas de audio, ya que garantiza que la salida de sonido sea clara, potente y libre de distorsión.
- **Memoria de configuraciones:** estos dispositivos pueden guardar la configuración del usuario, como calibraciones, posiciones de potenciómetros, entre otros; suele estar equipado con memoria no volátil (EEPROM o memoria flash), que conserva información incluso cuando el dispositivo está apagado. Esta función permite a los usuarios personalizar sus preferencias y configuraciones, que luego se recuperan cuando sean requeridas nuevamente.

2.2. Electrónica analógica y de potencia

Es una rama de la Ingeniería Electrónica cuyo objetivo principal es el diseño de sistemas que procesen y manipulen señales eléctricas continuas en el tiempo (mejor conocidas como señales analógicas) esto a través del uso de componentes como resistencias, capacitores, inductores, transistores, diodos y amplificadores operacionales. LTspice es una herramienta de simulación de circuitos que permite a ingenieros y diseñadores electrónicos modelar y analizar el comportamiento de estos circuitos analógicos sin necesidad de construir prototipos físicamente, donde es posible simular el comportamiento de los circuitos en el dominio del tiempo y la frecuencia, lo que permite una optimización y prueba exhaustivas de los diseños antes de la implementación física. nótese en Figura [2](#)

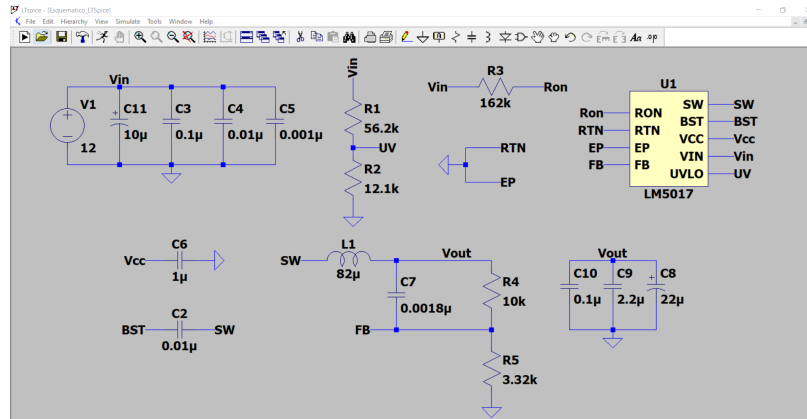


Figura 2: Interfaz de LTSpice

Por otro lado, la electrónica de potencia es un campo compartido tanto por la Ingeniería Electrónica como la Ingeniería Eléctrica, centrándose en el control y la conversión eficiente de la energía eléctrica según los requerimientos de energía de cada sistema. Al ser tan elemental en la industria y en la actualidad, sus usos son variados como fuentes de alimentación, controladores de motores, sistemas de energía renovable, transformación de energía mecánica a eléctrica, etc. De igual forma, LTSpice es usado ampliamente en esta rama para simular circuitos de conmutación, convertidores DC-DC, inversores eléctricos, etc. Esta herramienta también permite a los ingenieros el poder evaluar el rendimiento y la eficiencia de estos sistemas, analizando las pérdidas de energía y prediciendo el comportamiento bajo diferentes condiciones de carga, entrada y tolerancias de los componentes, facilitando el desarrollo de soluciones energéticas más efectivas y confiables.

2.3. Diseño y fabricación de placas de circuito impreso (PCB)

El diseño y fabricación de placas de circuito impreso (PCB) es una rama crucial de la electrónica que se centra en la creación del diseño físico y la estructura que soporta y conecta los componentes electrónicos. Este proceso implica la captura esquemática, el diseño del diseño y la producción final. Herramientas de software como Altium, Eagle y EasyEDA se utilizan ampliamente en este campo para agilizar y optimizar el proceso de diseño de PCB. Estas herramientas proporcionan funciones para la creación de esquemas, colocación de componentes, enrutamiento de conexiones eléctricas y verificación de reglas de diseño para garantizar que la PCB cumpla con las especificaciones requeridas (nótese en Figura 3). También ofrecen capacidades avanzadas como visualización 3D, análisis de integridad de señal e integración con sistemas CAD mecánicos, que ayudan a los diseñadores a crear PCB fabricables de alta calidad [2].

Además del diseño, estas herramientas de software apoyan el proceso de fabricación generando los archivos y la documentación necesarios para la producción. Esto incluye limas Gerber, limas de perforación y listas de materiales (BOM), que son esenciales para la fabricación y el montaje de las PCB. Al utilizar Altium, Eagle, EasyEDA y herramientas similares, los diseñadores pueden simular y validar sus diseños, identificar y corregir errores tempranamente y garantizar que el producto final funcione según lo previsto. Estas herramientas

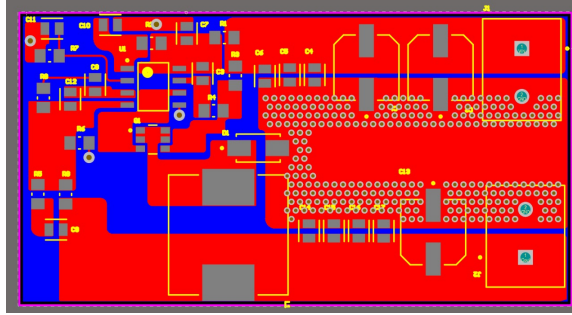


Figura 3: Interfaz de Altium Designer

también facilitan la colaboración entre los equipos de diseño, proporcionando control de versiones y funciones de gestión de proyectos que mejoran la eficiencia y la comunicación durante todo el ciclo de vida de desarrollo de PCB.

2.4. Implementación de sintetizador en proyectos anteriores

Dentro de la Universidad del Valle de Guatemala, como proyecto de graduación en la carrera de Ingeniería en Tecnología de Audio, se realizaron tres proyectos de graduación cuya finalidad fue el análisis, diseño e implementación de un sintetizador de audio modular mediante módulos analógicos y comunicación MIDI (nótese en la Figura 4), el cual está dividido de la firma que se presenta a continuación:

En el proyecto con nombre *Construcción de un sintetizador analógico modular y diseño e implementación de software para efectos, grabación y reproducción de audio*, desarrollado por Sofía Eugenia Salguero Martínez, el cual abarcó el análisis de los conceptos y circuitos claves utilizados para construir los módulos del sintetizador modular; donde de forma paralela se desarrolló un software capaz de grabar, aplicación de filtros y reproducción de audio en tiempo real, integrando así el software con el hardware del dispositivo [3].

De manera paralela, el proyecto con nombre *Análisis e implementación de un sintetizador de audio mediante circuitos analógicos y algoritmos digitales controlados por comunicación MIDI*, por Héctor Manuel de León Salguero, donde se desarrolló parte del módulo oscilador controlado por voltaje (VCO), así como la implementación del módulo de alimentación para energizar los módulos [4].

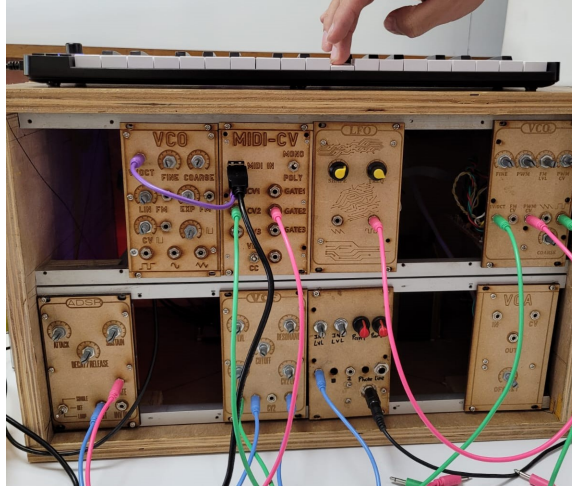


Figura 4: Sintetizador realizado

2.5. Desarrollo de proyectos similares

Por otro lado, en el proyecto con llamado *Emulación digital no lineal del sintetizador minimoog*, desarrollado por Jacqueline Magalí Guarcax Témax (nótese en Figura 5), el cual abarcó la emulación del circuito del oscilador controlado por voltaje (VCO) de un sintetizador Minimoog donde se planteó por medio de técnicas matemáticas un sistema dinámico no lineal implementable en software dentro del ambiente de Simulink en Matlab. El énfasis de este proyecto fue tomar las no linealidades de los circuitos para poder una señal auditiva de salida fidedigna a la analógica [5].

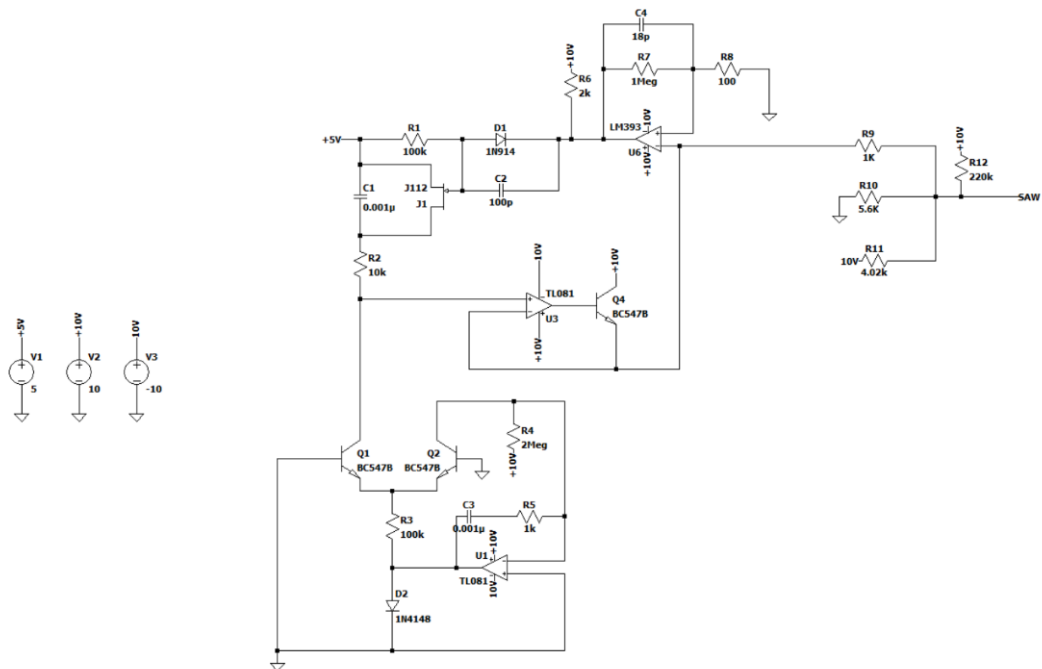


Figura 5: Módulo VCO [5]

De igual forma, en el proyecto *Desarrollo e implementación de un sintetizador digital de audio empleando metodologías auditivas y sustractivas* desarrollado por Manuel Antonio Valenzuela Herrera (nótese en Figura 6), cuyo objetivo principal fue el implementar algoritmos de síntesis auditiva y sustractiva para poder modular parámetros personalizados en tiempo real, orientado en la portabilidad dentro de una interfaz audio, una computadora portátil y un controlador MIDI 6.

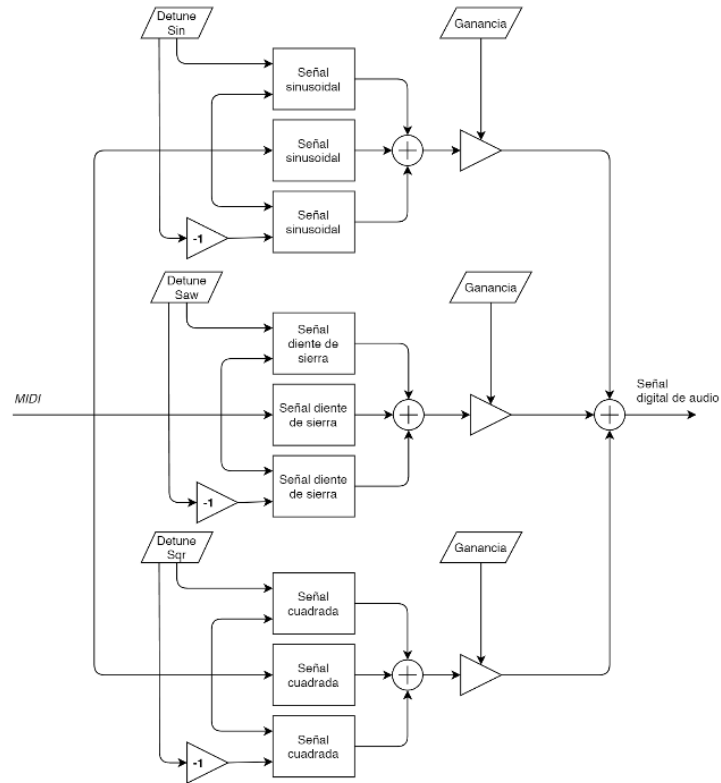


Figura 6: Sintetizador digital 6

Por último se tiene el proyecto llamado *Emulación digital de efectos de audio analógicos mediante análisis de sistemas dinámicos no lineales*, desarrollado por Diego Alberto Morales Ibañez (nótese en Figura 7), el cual a través del análisis de del comportamiento no lineal dentro los componentes electrónicos que conforman un procesador de audio, resaltando la alta fidelidad y calidad sonora 7.

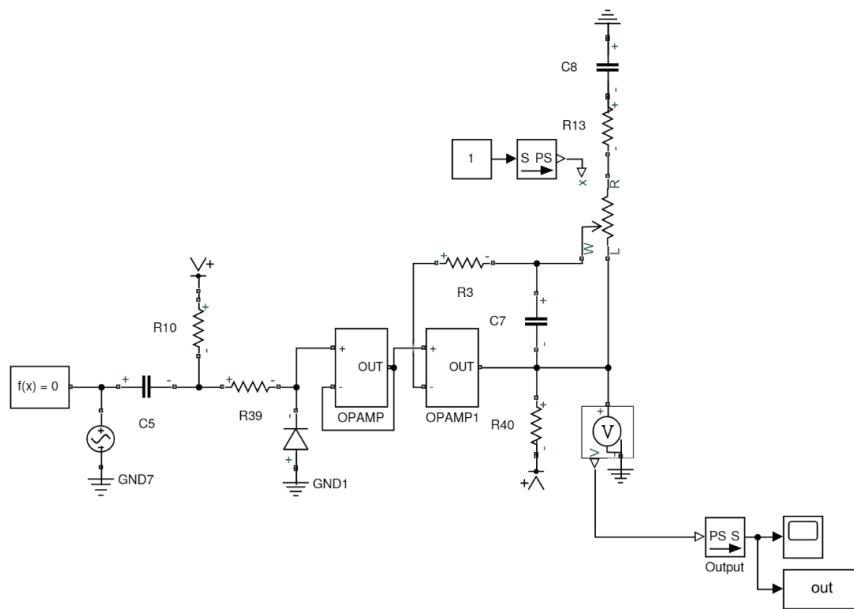


Figura 7: Emulación digital de pedal 7

El presente proyecto de graduación propone la actualización de un sintetizador analógico modular, diseñando un módulo orientado para la memoria de configuraciones personalizadas por el usuario, esto con el objetivo de explorar y comprender en profundidad los principios fundamentales de la síntesis de audio, con base principal en la electrónica analógica y la electrónica de potencia. Este proyecto surge en un contexto nostálgico y en la conservación de uso de sistemas analógicos, así como la invocación tecnológica en el resurgimiento de productos para la síntesis de audio. Se tomó la decisión de desarrollar este sintetizador analógico modular, basándose en los aspectos que se listan a continuación:

- **Nostalgia y la preservación de sistemas analógicos:** a pesar del crecimiento y traslado a sistemas digitales, aún se conserva el deseo de mantener y revivir los sonidos cálidos, auténticos y únicos que caracterizan a los sistemas analógicos clásicos, apreciados por músicos y entusiastas.
- **Innovación tecnológica:** de igual forma, el emplear una integración de técnicas modernas de diseño y fabricación, el uso de semiconductores de vanguardia y la incorporación de nuevas funcionalidades y mejoras en la interfaz de usuario, permitiendo a los diseñadores y músicos explorar posibilidades creativas manteniendo la esencia característica de los sistemas analógicos.
- **Exploración de los fundamentos de la síntesis de audio:** ya que los sintetizadores modulares brindan una plataforma flexible y altamente educativa para comprender los principios básicos de la síntesis de audio, siendo estos la generación de distintas formas de onda (tringular, PWM, diente de sierra), la modulación de amplitud (AM) de una señal, el filtrado y la configuración de la envolvente.
- **Contribución a la comunidad de música electrónica:** una vez completado, este dispositivo estará disponible como una herramienta para la educación en la Ingeniería Electrónica y la música, pudiéndolo usar desde entornos académicos hasta en estudios de grabación y presentaciones en vivo.

En resumen, el presente proyecto de graduación se justifica por la relevancia en el contexto actual de la síntesis de audio, los componentes vanguardistas, su potencial para el desarrollo de habilidades técnicas y creativas dentro de la carrera de Ingeniería Electrónica. De igual forma, se espera que el resultado final sea un sintetizador modular analógico funcional y de alta calidad, así como un testimonio del aprendizaje y la dedicación del autor en el campo de la electrónica de audio.

4.1. Objetivo general

Actualizar un sintetizador analógico modular y diseñar un módulo para la memoria de configuraciones del usuario.

4.2. Objetivos específicos

- Simular módulos existentes para su validación y actualización.
- Desarrollar e incorporar etapas de supresión de ruido eléctrico.
- Crear y fabricar placas de circuito impreso (PCB) adaptadas a las características de cada módulo que se implementará en el sintetizador.
- Desarrollar una plataforma de hardware y software que permita guardar la posición de los potenciómetros con configuraciones personalizadas del usuario.
- Elaborar una nueva carcasa para el sintetizador modular.

Este trabajo se enfoca en el diseño integral y actualización de un sintetizador modular, incorporando una etapa de memoria de configuración para el usuario, así como el diseño e implementación de una nueva carcasa. El objetivo principal es explorar y comprender en profundidad los principios fundamentales de la síntesis de audio y la electrónica analógica a través de aplicaciones prácticas y desarrollos innovadores. Considerando los módulos de antaño planteados décadas atrás como el VCO, VCA, EG, entre otros, con la diferencia del uso de los componentes y herramientas de vanguardia que existen hoy en día, como lo son las aplicaciones de código abierto para la simulación de circuitos como LTspice, o bien para el diseño y ruteo de circuitos de placa impreso (PCB) como lo es EasyEDA, además de creciente e innovadora documentación de los múltiples diseños y variaciones de los módulos. Desde el mes de julio hasta noviembre del 2024, el proyecto actual busca crear un conjunto de 6 módulos (VCO, VCA, EG, salida, alimentación y memoria de configuraciones), que funcione como una herramienta versátil y replicable que cierre la brecha entre los sistemas analógicos tradicionales y los métodos contemporáneos de síntesis de audio. De igual forma, el presente proyecto incluye una extensa investigación sobre la historia y la mecánica de los sintetizadores analógicos, el diseño detallado de la arquitectura del sintetizador y el desarrollo de interfaces fáciles de usar. Además, el proyecto implica la incorporación de capacidades de memoria avanzadas para almacenar y recuperar configuraciones del usuario, mejorando la funcionalidad y la experiencia del sintetizador. Por último, el proyecto se estructura de tal forma que pueda garantizar la escalabilidad, lo que permitirá la adición continua de nuevos módulos y mejoras para ampliar aún más sus capacidades y aplicaciones.

6.1. Historia de los sinterizadores

Desde el descubrimiento de la electricidad en el siglo XVIII, surge la duda y consigo la experimentación para poder utilizar este fenómeno de la naturaleza con fines del día a día, así como orientado a las artes, en específico a las musicales. Gracias a esta inquietud que ha perdurado siglos, es que se dio un disparo inimaginable con la creación de instrumentos musicales a partir de las corrientes eléctricas presentes en los dispositivos electrónicos, comenzando por instrumentos sencillos, donde luego de décadas de investigación y experimentación se tienen los equipos modernos de la actualidad [1].

Robert Arthur Moog, fue un Ingeniero Electrónico fue uno de los precursores en instrumentos de esta índole desde 1964 tras la publicación de su investigación en estos sistemas en su artículo *Módulos controlados por voltajes para la música electrónica* (nótese en [8]), donde supo conocer las limitaciones de los dispositivos musicales en esta década, lo cual lo orientó a la creación de módulos osciladores (VCO), amplificadores (VCA) y filtros (VCF) controlados por voltaje. Cabe resaltar, a pesar de que en los 60 no se contaba con tecnología de vanguardia como hoy en día, los descubrimientos de Moog fueron la alta fiabilidad y practicidad en sus módulos, donde además de su innovadora forma de controlar sonidos a través de la interconexión de módulos por medio de cables y el uso de perillas para variar los parámetros de las ondas sonoras [9].

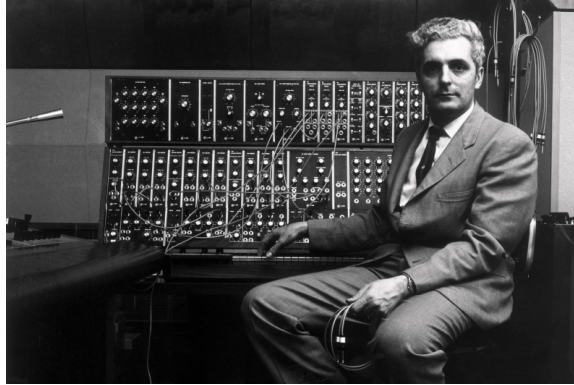


Figura 8: Robert Moog [10]

De manera paralela en 1963, Donald Buchla fue pionero en lo que se considera el primer **Sintetizador** modular funcional, el Buchla 100; él se centró en métodos de control no convencionales para sus instrumentos, como cintas o pads sensibles al tacto. La mayoría de las funciones de control se asignaron de manera diferente en comparación con los diseños de sus competidores, lo que resultó en una tracción comercial limitada. Mientras que Buchla atendía a músicos de vanguardia, Moog, por otro lado, consultaba de forma inagotable con los músicos intérpretes para poder asegurarse de los diseños finales fueran lo más fáciles de usar posible. Herb Deutsch un instructor de música, al ser uno de esos colaboradores estuvo involucrado en composiciones experimentales en cintas con los dispositivos de Buchla, quien expresó entusiasmo por los prototipos de módulos controlados por voltaje de Moog. Donde uniendo ambas pasiones desarrollaron especificaciones para un sistema de sintetizador modular completo y presentaron sus ideas al estudio de música de la Universidad de Toronto para su validación académica y seguimiento en el estudio de estos dispositivos musicales tan innovadores para su época [9].



Figura 9: Donald Buchla [11]

6.2. Sinterizadores digitales y analógicos

Estos sistemas están basados en circuitos electrónicos, teniendo la capacidad de controlar el flujo de corriente eléctrica mediante componentes resistivos, capacitivos, inductivos y semiconductores, pudiendo crear distintos módulos como osciladores, filtros y amplificadores para dar forma y modular ondas eléctricas y sonoras en tiempo real, donde a consecuencia del uso de estos componentes se obtienen los sonido cálido, orgánico y lleno de armónicos con muchas imperfecciones que muchos músicos encuentran atractivo (nótese Figura 10). Además, los sintetizadores analógicos ofrecen control práctico a través de perillas físicas (potenciómetros), controles deslizantes y cables de conexión, lo que permite una manipulación intuitiva de los parámetros de sonido 12.



Figura 10: Sinterizador modular analógico 13

De forma contraria, los sintetizadores digitales emplean microprocesadores o microcontroladores para poder generar y manipular sonido utilizando valores discretos, esto por medio de la modulación de señales digitales a continuas por medio de convertidores digital-analógico (DAC) por sus siglas en inglés. Estos utilizan algoritmos complejos para simular de forma digital el comportamiento de cada componente analógico, obteniendo así un control muy parecido sobre los parámetros y así poder producir una amplia gama de sonidos; sin embargo, se argumenta dentro de los entusiastas que estos dispositivos carecen de esos sonidos calidos y llenos de armónicos, comparado a sus homólogos analógicos debido a su naturaleza inherentemente perfecta y estéril. Sin embargo, los sintetizadores digitales suelen integrarse con funciones como bancos de memoria, ajustes preestablecidos y compatibilidad MIDI, lo que los hace más versátiles y convenientes para las necesidades modernas. 14.



Figura 11: Sintetizador digital 15

6.3. Sistema Eurorack

Este formato es un estándar en la fabricación de sintetizadores modulares, donde es principalmente conocido por su gran versatilidad y la alta disponibilidad de opciones para los usuarios. Este estándar, tiene sus raíces en la década de 1990 con el lanzamiento del sistema Doepfer A-100, donde éste se ha convertido en la base para la construcción de sintetizadores de este tipo dado a su diseño compacto y modularidad [16].

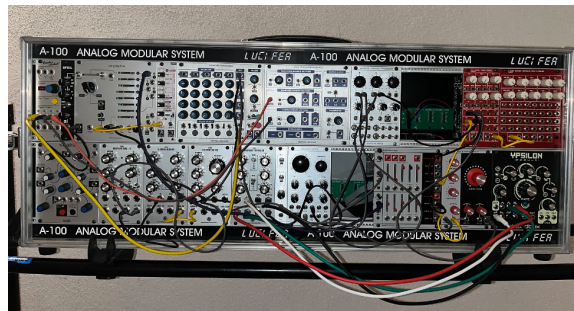


Figura 12: Ejemplo de sintetizador con estándar Eurorack [16]

Bajo éste estándar se tiene una altura definida de 3U, donde cada U equivale a 44.45 mm, obteniendo un alto de 133.35 mm; mientras que el ancho puede ser variable, este está dividido en unidades de "HP" (*horizontal pitch*) donde cada una equivale a 5.08 mm. Considerando estas medidas, es posible permitir a los usuarios personalizar y expandir sus sistemas de manera flexible al integrar módulos de diferentes fabricantes que siguen este estándar. [17] Para un mejor entendimiento, nótese Figura [13]

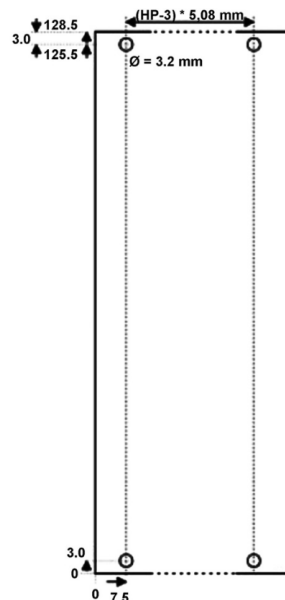


Figura 13: Diagrama de módulos Eurorack [17]

6.4. Oscilador controlado por voltaje (VCO)

Estos osciladores son un componente fundamental en los sintetizadores analógicos, ya que generan formas de onda cuya frecuencia está determinada por un voltaje controlado que le inyecte por el usuario (CV). Los VCO suelen contar con entradas para controlar el tono y la modulación, lo que permite la manipulación dinámica de su frecuencia y forma de onda en tiempo real (nótese en diagrama de bloques en la Figura 14).

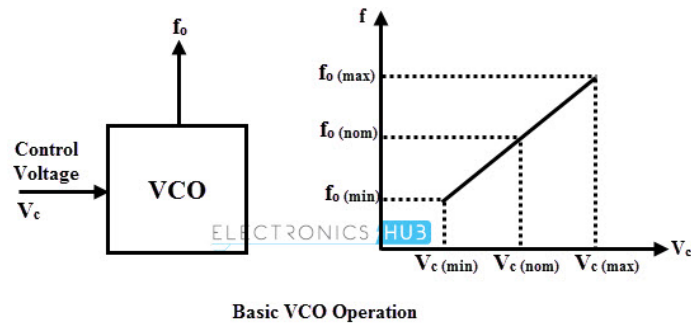


Figura 14: Funcionamiento de VCO 18

Estos módulos son cruciales para crear timbres variables en el tiempo, conteniendo oscilaciones complejas. Los VCO también desempeñan un papel fundamental en la configuración de la paleta sonora de los sintetizadores, ofreciendo a los músicos y diseñadores una herramienta versátil y útil para entregar una amplia gama de sonidos expresivos, dinámicos y agradables al oído 19.



Figura 15: Tipos de onda producidas por oscilador 20

6.5. Amplificador controlado por voltaje (VCA)

Por su parte, los amplificadores controlados por voltaje (VCA) son los responsables de modular de forma dinámica la amplitud o el volumen de las señales de audio en función de los voltajes de control (CV) de igual forma inyectados por el usuario. Estos módulos cuentan con entradas para señales de audio (usualmente proveniente de VCO) y voltajes de control (CV) (nótese diagrama de bloques en Figura 16), lo que permite una modulación de amplitud precisa y de los niveles de señal en tiempo real. Al ajustar el voltaje de control, los usuarios pueden dar forma a la evolución de la amplitud de la señal eléctrica, creando efectos como decaimiento, ataques intensos, tonos sostenidos en el tiempo, entre otros. Los módulos VCA son utilizados para poder dar forma al movimiento y articulación de las señales sintetizadas. Además, los VCA desempeñan un papel crucial en el ruteo y la mezcla de señales dentro de los módulos del sintetizador, proporcionando flexibilidad de conexión, así como control sobre la salida del sonido en general. Por lo tanto, dadas estas características hacen a los VCA

unas herramientas indispensables para moldear texturas de audio expresivas, dinámicas y únicas en configuraciones de sintetizadores analógicos [21].

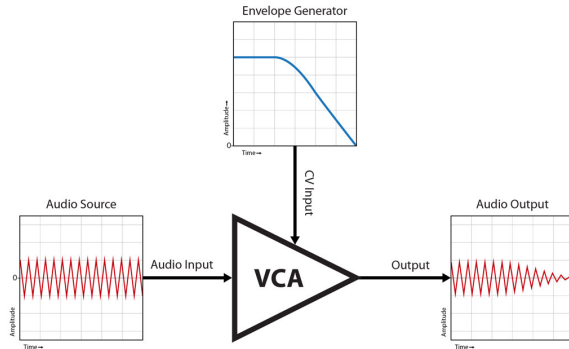


Figura 16: Diagramas de bloques de módulo VCA [22]

6.6. Generador envolvente

Este es el módulo en el que recae la modulación de amplitud, frecuencia o timbre de la señal eléctrica que se desea modular, ya que proporciona un control preciso sobre cómo evolucionan los sonidos con el tiempo. El funcionamiento de este sistema es capaz de variar los parámetros de ataque, caída, sostenido y liberación, o, por sus siglas en inglés, ADSR. Dentro de la fase de ataque (*attack*), el sonido aumenta gradualmente desde un punto inicial hasta alcanzar su valor máximo; seguidamente, en la etapa de la caída (*decay*), la señal disminuye a un nivel sostenido cuando se presiona una tecla mediante la activación de un disparador; finalmente, en la fase de liberación (*sustain*), el sonido disminuye hasta el silencio una vez que se suelta la tecla. Cabe resaltar que módulo EG-ADSR permite variar la duración y la forma de cada una de estas etapas, permitiendo un sinfín de posibilidades creativas y expresivas para encontrar un sonido dinámico y orgánico [23].

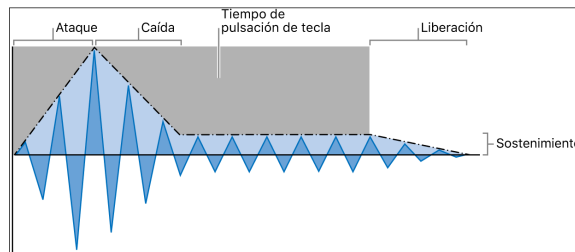


Figura 17: Diagrama de envolvente [24]

6.7. Teoría de circuitos para sintetizador modular

Para poder tener un correcto entendimiento de los sintetizadores analógicos modulares, es necesario profundizar en el funcionamiento y la teoría detrás de los diferentes módulos a

implementar. Por lo tanto, a continuación se introducen tópicos cruciales para el desarrollo de los módulos del sintetizador.

6.7.1. Schmitt Trigger

Este tipo de circuito se cataloga dentro de la familia de los comparadores, ya que gracias a este es posible convertir una señal de entrada analógica en una señal discreta mediante la histéresis del conjunto, donde su principal uso es en el procesamiento de señales digitales, filtros de audio, entre otros [25]. Nótese su topología en Figura 18

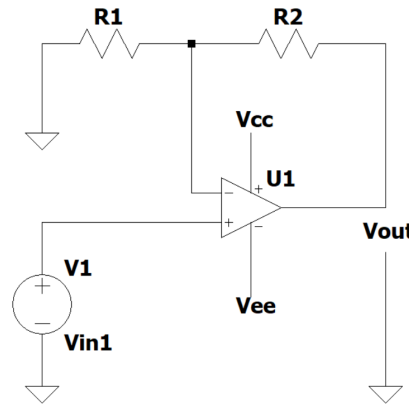


Figura 18: Circuito Schmitt Trigger

Este circuito funciona mediante dos umbrales: un voltaje alto (V_{th+}) y otro más bajo (V_{th-}). Cuando el voltaje de entrada excede el umbral superior (V_{th+}), la salida cambia a un estado lógico alto. Mientras que para el caso del voltaje de entrada cae por debajo del umbral inferior (V_{th-}), la salida cambia a un estado lógico bajo. Cabe resaltar que la histéresis entre los dos voltajes evita la conmutación de la salida cuando el voltaje en la entrada se encuentra cerca de los umbrales, lo que permite eliminar el ruido y proporcionar transiciones de salida estables [25]. Es importante mencionar que voltajes umbrales tienen una dependencia directa en las resistencias del circuito y de la alimentación (nótese en Figura 18). Al tomar una configuración común con retroalimentación positiva, se tienen las siguientes ecuaciones para los voltajes umbrales:

$$V_{th+} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_{out(high)} \quad (1)$$

$$V_{th-} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_{out(low)} \quad (2)$$

Por lo tanto, la histéresis (ΔV) es la diferencia entre los dos voltajes umbrales:

$$\Delta V = V_{th+} - V_{th-} \quad (3)$$

6.7.2. Amplificador diferencial de transistores

Se utiliza para poder amplificar la diferencia de potencial que hay entre dos señales de entrada. Éste por lo general, consta de dos transistores, donde las señales de entrada correspondientes son inyectadas a las bases de los transistores, mientras que la salida se toma de la diferencia entre los colectores. Esta forma de amplificación es usada que requieren una alta precisión, como circuitos de instrumentación, sistemas de comunicación y electrónica de audio [26].

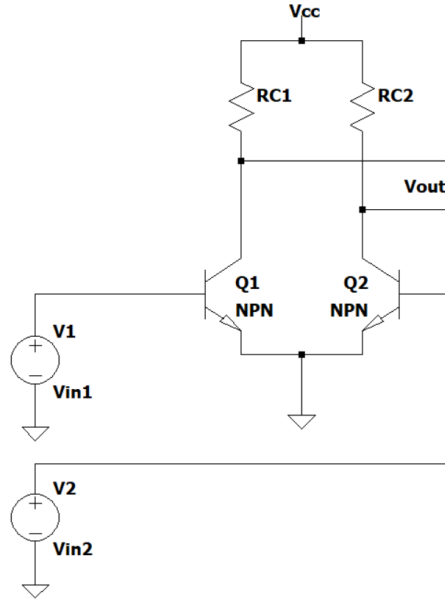


Figura 19: Circuito amplificador diferencial

Se sabe que la corriente de emisor de los transistores está determinada por la diferencia de potencial entre su base y resistencia en el emisor común, mientras que la salida es determinada por el voltaje que existe entre los colectores de Q_1 y Q_2 generando así la señal de salida V_{Out} .

En un transistor BJT, la corriente de colector I_C está relacionada con la corriente de base I_B mediante la ganancia β :

$$\begin{aligned} I_{C1} &= \beta I_{B1} \\ I_{C2} &= \beta I_{B2} \end{aligned}$$

Donde β es la ganancia de corriente de los transistores. De esta forma, la salida del amplificador es la diferencia de potencial entre los colectores de los transistores Q_1 y Q_2 :

$$V_{out} = V_{C1} - V_{C2} \quad (4)$$

Considerando esto, los voltajes en los colectores pueden expresarse en términos del voltaje de la fuente V_{CC} y las caídas de voltaje a través de las resistencias de los colectores R_{C1} y R_{C2} :

$$\begin{aligned} V_{C1} &= V_{cc} - I_{C1}R_{C1} \\ V_{C2} &= V_{cc} - I_{C2}R_{C2} \end{aligned}$$

Seguidamente, la diferencia de voltaje entre las entradas V_{in1} y V_{in2} se refleja en la diferencia de los voltajes base-emisor (V_{BE}) de los transistores mediante la expresión:

$$V_{in1} - V_{in2} = V_{BE1} - V_{BE2} \quad (5)$$

Donde, se sabe que:

$$I_{C1} = \beta I_{B1}$$

$$I_{C2} = \beta I_{B2}$$

La corriente de base está relacionada con el voltaje de entrada mediante el de la ley de Ohm $I_B = \frac{V_{BE}}{R_B}$.

Dada la diferencia de voltaje por las dos señales en la entrada $V_{in1} - V_{in2}$ esto causa una diferencia en los voltajes de base-emisor V_{BE} :

$$V_{in1} - V_{in2} = V_{BE1} - V_{BE2}$$

Ahora bien, al utilizar las ecuaciones para los voltajes de colector, se puede expresar el voltaje de salida V_{out} :

$$V_{out} = (V_{CC} - I_{C1}R_{C1}) - (V_{CC} - I_{C2}R_{C2})$$

Donde al simplificar se obtiene:

$$V_{out} = -I_{C1}R_{C1} + I_{C2}R_{C2} \quad (6)$$

Finalmente, se reemplaza la corriente de colector I_{C1} y I_{C2} por sus expresiones en términos de la ganancia β y la corriente en la base I_B como se muestra:

$$V_{out} = -(\beta I_{B1}R_{C1}) + (\beta I_{B2}R_{C2}) \quad (7)$$

Por lo tanto, al tener una diferencia en las corrientes de base amplificada por β y modulada por las resistencias de colector RC , es posible producir el voltaje de salida del amplificador diferencial.

6.7.3. Amplificador clase AB

Esta topología combina las características de los amplificadores Clase A al operando durante todo el ciclo de la señal de entrada, mientras que el Clase B conduce únicamente durante la mitad de un ciclo; esto con el fin de obtener una mejor eficiencia y linealidad en la señal de salida. Este circuito consta de dos transistores complementarios (Q1 y Q2) y dos

diodos (D1 y D2) que establecen un voltaje de polarización constante en las bases de los transistores, para poder garantizar que ambos transistores conduzcan ligeramente con una señal de entrada cero, reduciendo de esta forma la distorsión de cruce por cero, mientras que las resistencias en paralelo a los colectores proporcionan la corriente de polarización necesaria para esta activación. La señal de salida se toma de la unión de los colectores de Q1 y Q2, proporcionando una versión amplificada en corriente de la señal de entrada con eficiencia mejorada y distorsión reducida. Este sistema permite asegurar que cada transistor pueda operar en su respectiva región lineal, proporcionando un equilibrio entre la alta fidelidad de los amplificadores Clase A y la eficiencia de los amplificadores Clase B [27].

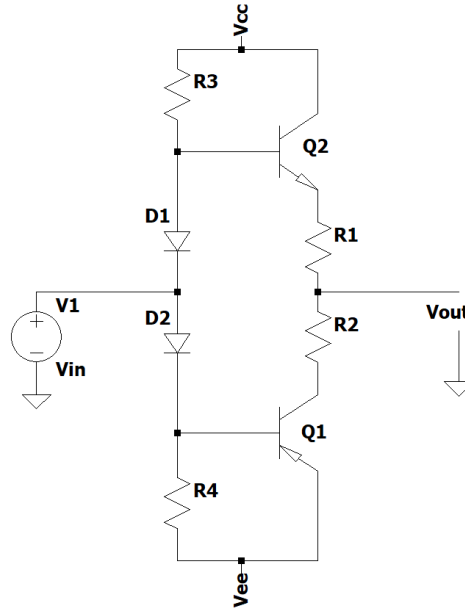


Figura 20: Circuito amplificador clase AB

Donde el voltaje de polarización en las bases de los transistores puede ser expresado de la siguiente forma:

$$V_{B1} = V_{in} + V_{D1} \quad (8)$$

$$V_{B2} = V_{in} - V_{D2} \quad (9)$$

Por otro lado, la corriente a través de las resistencias de polarización de los diodos R_3 y R_4 puede ser expresada como:

$$I_{R3} = \frac{V_{cc} - V_{B2}}{R_3}$$

$$I_{R4} = \frac{V_{ee} + V_{B1}}{R_4}$$

Ahora bien, considerando la ganancia de los transistores (β) Q1 y Q2 se puede expresar la corriente respectiva de colector (I_C):

$$\begin{aligned} I_{C1} &= \beta I_{B1} \\ I_{C2} &= \beta I_{B2} \end{aligned}$$

Por último, el voltaje de salida V_{out} no se verá afectado a pesar de su paso por la topología, llamándolo espejo de voltaje, pudiendo confirmar que se amplificará únicamente la corriente de salida del sistema.

$$V_{out} = V_{cc} - I_{C2}R2 = V_{ee} + I_{C1}R1 \quad (10)$$

6.8. Procesamiento de señales

Primeramente, para que una señal pueda ser representada y manipulada como se mencionará a continuación, debe ser estrictamente un sistema lineal e invariante en el tiempo (LTI), por sus siglas en inglés. Ya que si linealidad se combina con la representación de una secuencia general como una combinación lineal de impulsos desfasados, puede ser completamente caracterizado por su respuesta al impulso unitario [28]. A continuación, se presentan las condiciones que debe cumplir el sistema para poderlo caracterizar como uno LTI:

- **Linealidad:** la clase de sistemas lineales se define por el principio de superposición. Si $y_1[n]$ y $y_2[n]$ son las respuestas de un sistema cuando $x_1[n]$ y $x_2[n]$ son las entradas respectivas, entonces el sistema es lineal si y solo si [28]:

$$\mathcal{T}(x_1[n] + x_2[n]) = \mathcal{T}(x_1[n]) + \mathcal{T}(x_2[n]) = y_1[n] + y_2[n] \quad (11)$$

- **Invariancia en el tiempo:** es un sistema en el cual un desplazamiento o retraso temporal de la secuencia de entrada provoca un desplazamiento correspondiente en la secuencia de salida [28]. Específicamente, se dice que el sistema es invariante en el tiempo si, para todo n_0 , la secuencia de entrada con valores:

$$x[n - n_0] = y[n - n_0] \quad (12)$$

Al cumplir estas condiciones iniciales del sistema a analizar, se procede a muestrear una señal analógica a una frecuencia fija bajo el criterio de Nyquist-Shannon, el cual establece que la frecuencia de muestreo f_s debe ser mayor que el doble del componente frecuencial más alto en la señal de interés [28], esto con el fin de garantizar una reconstrucción acertada entre la señal original y la señal muestreada, nótese en Figura [21].

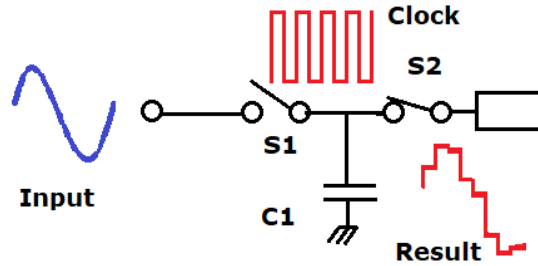


Figura 21: Funcionamiento de micrófono [29]

Ahora bien, la señal eléctrica una vez esté muestreada dentro del dominio del tiempo discreto, se somete a un procesamiento mediante un microcontrolador, donde se manipula matemáticamente en tiempo discreto mediante algoritmos de ecuaciones de diferencias lineales [28]. Donde la forma general de una ecuación de diferencias es la mostrado en la expresión:

$$\sum_{k=0}^N a_k y[n - k] = \sum_{k=0}^M b_k x[n - k] \quad (13)$$

Dentro de los algoritmos que implementan las ecuaciones de diferencias pueden orientarse al filtrado, modulación, compresión y equalización de la señal. Usualmente, los algoritmos de procesamiento de señales digitales se aplican para mejorar, variar o filtrar la señal de audio según la aplicación deseada [28].

Por último, la señal discretizada se convierte nuevamente en una señal analógica a través de un convertidor de digital a analógico (DAC, por sius siglas en inglés), permitiendo reproducirla a través de bocinas o audífonos. Cabe resaltar que la precisión de la reconstrucción de la señal depende directamente de los factores como frecuencia de muestreo, resolución de bits y la calidad de los componentes dentro del módulo DAC [30].

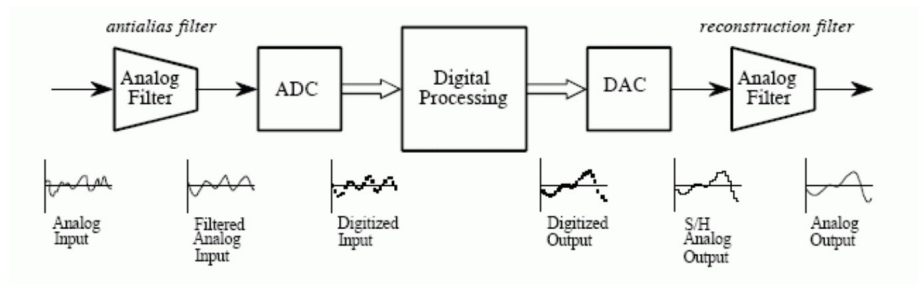


Figura 22: Procesamiento de señales [31]

6.9. Sistema de control clásico

Estas etapas son los responsables de poder regular o manipular el comportamiento de otros sistemas o procesos en específico, cuyo objetivo principal en la electrónica es garantizar la estabilidad, rendimiento y eficiencia de sistemas complejos [32]. En particular, cuando se analiza el comportamiento de sistemas de segundo orden, los parámetros de control adquieren una relevancia fundamental, ya que debido a la simplicidad y utilidad de modelar sistemas de segundo orden, es posible describir una amplia gama de sistemas físicos reales, donde la función de transferencia general que describe un sistema de segundo orden puede ser expresada como:

$$H(s) = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (14)$$

Donde ω_n es la frecuencia natural del sistema, ζ es el coeficiente de amortiguamiento y $s = \sigma + j\omega$ es la variable compleja de Laplace. Esta expresión es fundamental para entender la dinámica de los sistemas de segundo orden, ya que los parámetros mencionados determinan características cruciales como la rapidez de respuesta, la estabilidad y la presencia de oscilaciones. Para un control efectivo, es importante considerar los siguientes parámetros:

1. **Coefficiente de amortiguamiento (ζ):** es una medida del grado de oscilación del sistema en la respuesta transitoria. Se define como la relación entre el coeficiente de amortiguación real y el coeficiente de amortiguación crítico e indica las características de estabilidad y respuesta del sistema [32]. Donde esta constante está definida en un intervalo de:

$$0 < \zeta < 1 \quad (15)$$

2. **Overshoot (M_{pp}):** asimismo, esta es una cantidad en la que la salida del sistema excede su valor final de estado estable durante la respuesta transitoria después de un cambio escalonado en la señal de entrada. Es una indicación de la estabilidad del sistema y puede provocar oscilaciones indeseables o zumbidos en la salida [32]. Ahora bien, este parámetro de rendimiento se define en términos del coeficiente de amortiguamiento antes descrito:

$$M_{pp} = e^{-\frac{\zeta\pi}{\sqrt{1-\zeta^2}}} * 100\% \quad (16)$$

3. **Frecuencia natural (ω_n):** frecuencia a la que el sistema oscila cuando se le perturba desde su posición de equilibrio sin ningún forzamiento externo. Está relacionado con los valores propios y los modos intrínsecos del sistema y proporciona información sobre el comportamiento dinámico del sistema [32].

4. **Frecuencia amortiguada (ω_d):** este factor de rendimiento define la frecuencia a la que un sistema de oscila bajo la influencia de un amortiguamiento, reflejando el efecto combinado de la inercia y la resistencia en la respuesta transitoria del sistema [32]. Donde se puede definir como:

$$\omega_d = \omega_n \sqrt{1 - \zeta^2} \quad (17)$$

5. **Tiempo de subida (t_r):** por otro lado, este es definido como el tiempo que le toma a la salida del sistema en subir desde el valor más bajo hasta el valor más alto especificado por primera vez después de un cambio de una escalón unitario en la señal de entrada, donde también es considerado un indicador de la velocidad de respuesta del sistema [32]. Este parámetro puede definirse al ser inversamente proporcional a la frecuencia natural:

$$t_r \approx \frac{1.8}{\omega_n} \quad (18)$$

6. **Tiempo de pico (t_p):** este parámetros se define como el tiempo necesario para que la salida del sistema alcance su valor máximo después de un cambio en la señal de entrada. Éste proporciona información sobre la velocidad de respuesta del sistema y está relacionada con el ancho de banda del sistema [32], donde puede ser expresada en términos de la frecuencia amortiguada:

$$t_p = \frac{\pi}{\omega_d} \quad (19)$$

7. **Error de estado estacionario (e_{ss}):** este concepto se define como la diferencia entre la salida deseada y la salida real del sistema, donde esta es una forma de poder medir la precisión con la que el sistema converge al valor deseado [32]. Este último parámetro puede ser obtenido mediante el cálculo del límite que se muestra a continuación:

$$e_{ss} = \lim_{t \rightarrow \infty} e(t) \quad (20)$$

8. **Tiempo de estabilización (t_s):** por otra parte a diferencia del anterior, este es el tiempo necesario para que la salida del sistema pueda estabilizarse por debajo de un rango en específico (usualmente al 5%) luego de la entrada de escalón, este representa el tiempo que le toma al sistema en alcanzar y mantener su nueva condición de estado estacionario [32]. Cabe mencionar, que es posible posible obtener diferentes expresiones para un mismo parámetro, esto con el fin de obtener un error de estado estable controlable, nótese:

- $e_{ss}=2\%$: para poder obtener un error menor o igual al 2%, se puede expresar el tiempo de asentamiento como:

$$t_{s(2\%)} = \frac{4}{\zeta \omega_n} \quad (21)$$

- $e_{ss}=5\%$: mientras que para tener un error menor o igual se puede expresar con esta variación de la ecuación anterior:

$$t_{s(5\%)} = \frac{3}{\zeta \omega_n} \quad (22)$$

Ahora habiendo mencionado la definición de estos parámetros de control para sistemas de segundo orden, en la Figura 23 se ejemplifica de forma gráfica cada factor al momento de someter un sistema a un escalón unitario:

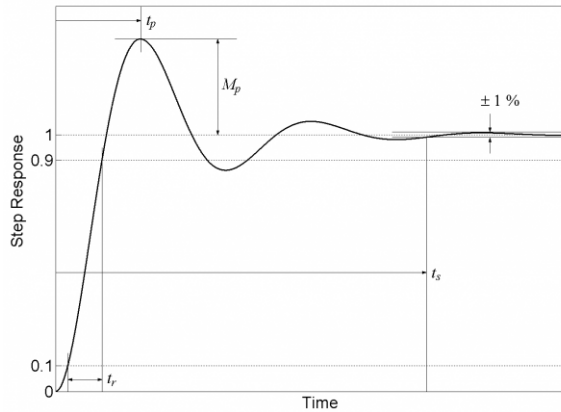


Figura 23: Parámetros de control [33]

6.10. Controlador PID

Este es un sistema de control con retroalimentación que puede ajustar una variable de proceso ($e(t)$) en función de la diferencia entre la referencia deseada y el valor medido de la salida de la planta [32]. Donde este controlador busca minimizar el error del sistema, mediante el uso de tres etapas en paralelo para mitigar distintas etapas de esta diferencia entre la salida y la referencia, donde puede ser dividido en dos tipos de aplicaciones, como se lista a continuación:

6.10.1. Controlador PID continuo

- **Ganancia proporcional (P):** esta etapa como su nombre lo indica, la salida tendrá una amplificación respecto a la señal de entrada; pudiendo así corregir el error presente [32]. Esta, puede expresarse como:

$$P(t) = K_p e(t) \quad (23)$$

- **Ganancia integral (I):** el objetivo principal de esta etapa es el poder eliminar errores de estado estacionario a lo largo del tiempo, considerando el error pasado que se le inyectó, lo cual permite corregirlo en su estado estable así como la convergencia a la referencias [32]. Donde puede expresarse de la siguiente forma:

$$I(t) = K_I \int_0^t e(\tau) d\tau \quad (24)$$

- **Ganancia derivativa (D):** por otro lado, por medio de la parte derivativa es posible anticiparse a posibles variaciones de la salida [32], pudiendo expresarlo como.

$$D(t) = K_D \frac{de(t)}{dt} \quad (25)$$

Considerando las ganancias independientes, se procede a la superposición de éstas [32], donde la entrada efectiva de la planta se describe como:

$$u(t) = K_p e(t) + K_I \int_0^t e(\tau) d\tau + K_D \frac{de(t)}{dt} \quad (26)$$

Ahora bien, teniendo la sustentación teórica antes mencionada, en la Figura 24 se brinda por medio de álgebra de bloques la distribución general de un controlador PID.

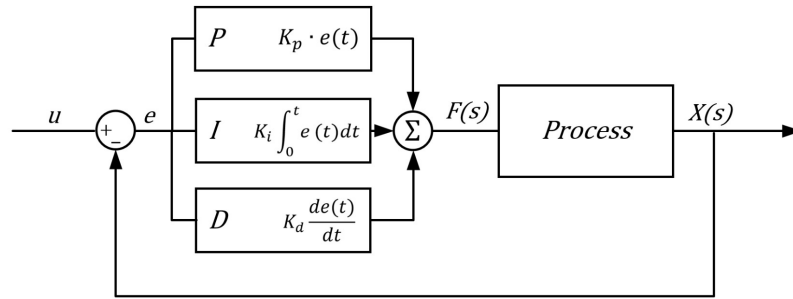


Figura 24: Controlador PID [34]

6.10.2. Controlador PID digital

A diferencia del control analógico, el control digital implica el procesamiento de señales utilizando dispositivos digitales como microcontroladores. Bajo este enfoque, la señal de entrada se convierte a formato digital mediante un proceso de muestreo y cuantificación (ADC), donde el error y la salida se manipulan matemáticamente en tiempo discreto mediante algoritmos de ecuaciones de diferencias. Sin embargo, para poder definir de forma correcta la ecuación de diferencias del controlador, es necesario un ajuste en los parámetros Proporcional, Integral y Derivativo ya que serán manipulados mediante valores discretos y no continuos [32], como se muestra a continuación:

- **Ganancia proporcional (P):** esta etapa al ser únicamente de escalamiento, no sufre cambios más allá del cambio de dominio [32]. Donde se reescribe como:

$$P[n] = K_p e[n] \quad (27)$$

- **Ganancia integral (I):** sin embargo, para la fase integral del controlador se puede reescribir su respectiva expresión en términos de una sumatoria de Riemman [32]:

$$K_I \int_0^t e(\tau) d\tau = K_I \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \sum_{n=0}^k e[n \Delta t]$$

Donde al estar buscando únicamente una aproximación, se puede tener un periodo de muestreo lo suficientemente pequeño para simplificar el límite de la sumatoria. Donde, al considerar el valor anterior guardado en memoria:

$$e[n - 1] = \sum_{n=0}^{k-1} e[n \Delta t]$$

Así como el valor actual del error:

$$e[n] = \sum_{n=0}^k e[n \Delta t]$$

Se puede tomar la suma de ambos errores como el error total obtenido:

$$E_I[n] = e[n - 1] + e[n] \rightarrow E[n] = \sum_{n=0}^{k-1} e[n \Delta t] \Delta t + \sum_{n=0}^k e[n \Delta t] \Delta t$$

Por lo tanto, se puede tomar este término acoplado para su respectiva implementación en una ecuación de diferencias:

$$I[n] = K_I E_I[n] \Delta t \tag{28}$$

- **Ganancia derivativa (D):** por otro lado, al momento de acoplar el parámetro derivativo, se reescribe como la definición de la derivada [32]:

$$\frac{d e(t)}{d t} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{e[k \Delta t] - e[(k - 1) \Delta t]}{\Delta t}$$

Donde de manera similar a la integral, al estar buscando únicamente una aproximación, se puede tener un periodo de muestreo lo suficientemente pequeño para simplificar el límite. Pudiendo dividir la expresión en su error anterior guardado en memoria:

$$e[(n - 1) \Delta t]$$

Así como su error actual:

$$e[n \Delta t]$$

Se puede tomar la suma de ambos errores como el error total obtenido:

$$E_D[n] = e[(n - 1) \Delta t] + e[n \Delta t]$$

Por lo tanto, se puede tomar este término acoplado para su respectiva implementación en una ecuación de diferencias:

$$D[n] = \frac{E_D[n]}{\Delta t} \tag{29}$$

Considerando las ganancias independientes ahora acopladas al dominio de tiempo discreto, se procede a la superposición de éstas para la implementación de una ecuación de diferencias, donde la entrada efectiva de la planta se describe como:

$$u[n] = K_p e[n] + K_I E_I[n] \Delta t + K_D \frac{E_D[n]}{\Delta t} \tag{30}$$

La solución de la ecuación de diferencias, aún se encuentra dentro del dominio discreto, por lo que es necesaria una etapa que convierta esta solución nuevamente a valores continuos, mediante un DAC [32]. En la Figura 25 se muestra un diagrama de bloques con la implementación del controlador digital.

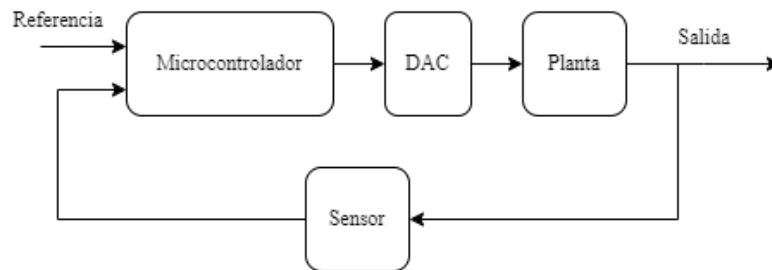


Figura 25: Controlador PID digital [35]

<

6.11. Fuentes de alimentación

También conocida como PSU por sus siglas en inglés (power supply unit) es el módulo responsable de suministrar la suficiente energía eléctrica a circuitos o dispositivos electrónicos. Su principio se base en tomar un voltaje de entrada del suministro eléctrico, y a través de sus distintos componentes, pueda entregar un voltaje de salida regulado y una corriente adecuada para alimentar sistemas electrónicos, en este caso, a un sintetizador analógico modular. Las fuentes de alimentación pueden separarse en varios tipos, siendo estos: las fuentes de alimentación lineales y las fuentes de alimentación de modo conmutado, cada una con sus propias características y aplicaciones [36].

6.11.1. Fuentes lineales

Las fuentes de alimentación lineales regulan el voltaje de salida disipando el exceso de energía en forma de calor. Utilizan un regulador lineal para lograr esta regulación, lo que da como resultado un diseño simple con poco ruido y mínima interferencia electromagnética (EMI). Sin embargo, son menos eficientes que los SMPS, especialmente cuando el voltaje de entrada es significativamente mayor que el voltaje de salida [36].

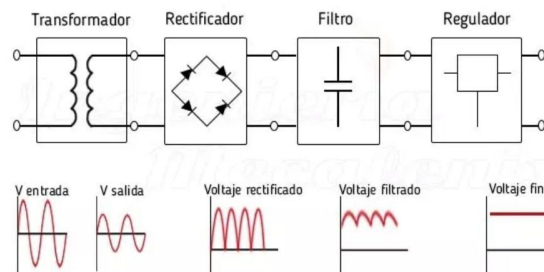


Figura 26: Diagrama de fuente lineal [37]

6.11.2. Fuentes conmutadas

Switched-Mode Power Supplies (SMPS) por sus siglas en inglés, regulan el voltaje de salida encendiendo y apagando rápidamente un dispositivo semiconductor (generalmente un transistor). Esto les permite convertir eficientemente el voltaje de entrada al voltaje de salida deseado con una mínima disipación de calor. Las SMPS son más pequeñas, livianas y más eficientes que las fuentes de alimentación lineales, lo que las hace ideales para aplicaciones donde el tamaño, el peso y la eficiencia son factores críticos [36].

6.12. Convertidores tipo Buck

Estos convertidores DC-DC, se enfocan en reducir de forma eficiente un voltaje de entrada alto hacia un voltaje de salida más bajo, según el voltaje y corriente necesarias según el

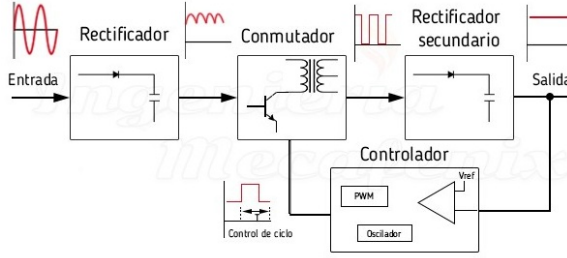


Figura 27: Diagrama de fuente conmutada [37]

sistema a alimentar. Los convertidores tipo Buck se utilizan muy frecuentemente en aplicaciones que requieren una fuente de alimentación con un alto grado de eficiencia (alimentación de microprocesadores, dispositivos de comunicación y equipos que funcionan con baterías). Su eficiencia y capacidad para mantener una salida estable bajo diferentes condiciones de carga los hacen ideales para sistemas portátiles e integrados [38].

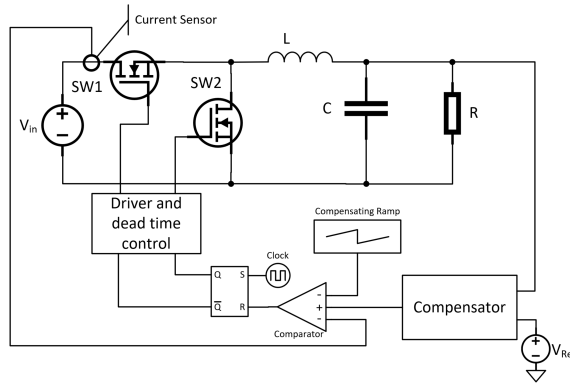


Figura 28: Diagrama de fuente conmutada [39]

El funcionamiento de este sistema se basa en la conmutación a altas frecuencias de un interruptor (comúnmente un transistor) mediante el uso de modulación de ancho de pulso (PWM), para poder controlar la cantidad de energía que se le es inyectada al inductor de salida (nótese en Figura 28); donde al cortar la conducción del transistor, la corriente recorre el inductor causando la acumulación de energía en forma de un campo magnético, mientras que al activar el interruptor la energía almacenada es liberada hacia la carga a pasando por la etapa de filtrado por un capacitor para suavizar las oscilaciones generadas en el voltaje de salida por la conmutación del interruptor [40]. Considerando este sistema, es posible plasmar la expresión matemática que describe el voltaje de salida de un convertidor tipo buck en función del ciclo de trabajo de la conmutación:

$$V_{out} = \frac{(\% \text{ Ciclo de trabajo}) V_{in}}{100} \quad (31)$$

Donde el ciclo de trabajo puede ser expresado en términos de los períodos que se mantiene encendido y apagado el interruptor:

$$\% \text{Ciclo de trabajo} = \left(\frac{t_{on}}{t_{on} + t_{off}} \right) * 100 \% \quad (32)$$

Por otro lado, para poder obtener la mayor precisión posible, es esencial el uso de retroalimentación y sistemas de control, a partir de sensores de voltaje en la etapa de salida, así como comparación de error y utilización de controladores (nótese la Figura 28) para garantizar que la salida de voltaje sea la esperada 40. Sin embargo, a pesar de estos aspectos positivos, en el voltaje de salida se presenta un contenido de armónicos considerable en un orden de magnitud similar a la frecuencia de conmutación, como se muestra en el diagrama de Bode de la Figura 29.

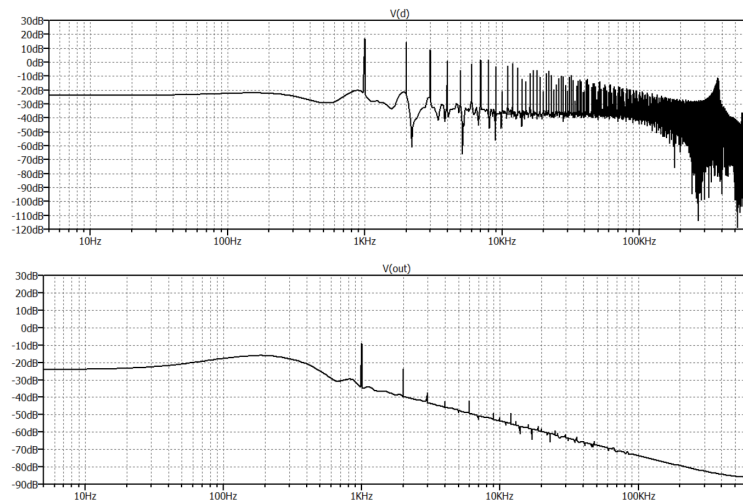


Figura 29: Diagrama de Bode de un convertidor tipo Buck 40

Con el fin de alcanzar los objetivos planteados se llevará a cabo la siguiente metodología:

- **Simulación en LTspice:** para esta primera fase, se utilizará el software LTspice para simular y crear prototipos precisos para las múltiples configuraciones y topologías de circuitos que componen el sintetizador modular. Al utilizar esta herramienta, se podrá explorar y comprender los fundamentos teóricos del presente diseño, asegurándose de que cumpla con las especificaciones deseadas previo a la implementación física. Este proceso iterativo de simulación de prototipos permitirá ajustar parámetros como la generación de formas de onda, esquemas de modulación y características de filtros, sentando una base sólida para las etapas posteriores de desarrollo. El progreso se medirá mediante la cantidad de configuraciones de circuitos simulados, la comparación entre los resultados de la simulación y las especificaciones deseadas y la cantidad de iteraciones realizadas para ajustar y mejorar los prototipos.
- **Diseño de circuito en EasyEDA:** en esta fase, se realizará un pequeño estudio de mercado para poder identificar y obtener los componentes adecuados para la construcción del sintetizador modular analógico. Esto implicará no solo seleccionar componentes en función de sus especificaciones técnicas, sino también considerar factores como la disponibilidad, la confiabilidad y la rentabilidad económica. Al seleccionar cuidadosamente la selección de componentes, el objetivo es garantizar un rendimiento óptimo y una longevidad para el sintetizador, respetando al mismo tiempo las restricciones presupuestarias. El progreso se evaluará mediante el porcentaje de componentes seleccionados y cotizados, la comparación de precios y disponibilidad de componentes de diferentes proveedores y la evaluación de la calidad y confiabilidad de los componentes seleccionados; así como la implementación del circuito con los componentes seleccionados en el software EasyEDA.

- **Diseño y fabricación de placas de circuito impreso (PCB):** una vez finalizada la lista de componentes, se procederá a diseñar las placas de circuito impreso (PCB) mediante el software EasyEDA, se diseñarán los circuitos considerando los factores de ruteo de señales, ubicación de los componentes, anchos de pista adecuados y la gestión térmica. El progreso se medirá por el avance en los diseños de PCB de acuerdo al cronograma establecido, la revisión de los diseños de PCB por parte profesionales en desarrollo y el tiempo requerido para terminar el diseño cada etapa y pasar a la fabricación. Una vez verificados y validados los PCB individuales, se fabricarán placas de circuito impreso a la corporación JLCPCB [41], corporación dedicada a la manufactura y ensamblaje de las placas, para así poder tener los mejores resultados y acabados posibles. El progreso se evaluará mediante la confirmación del inicio de la producción con el fabricante seleccionado, la evaluación de la calidad de los tableros finales producidos y el cumplimiento de los plazos de entrega establecidos por el fabricante.
- **Funcionamiento de módulos:** tras recibir los PCB debidamente ensamblados, se procederá a dar los últimos retoques en la soldadura de los componentes dentro de las placas, donde se probará cuidadosamente cada placa para obtener una alta fidelidad entre las simulaciones realizadas en la primera etapa, esto mediante capturas en osciloscopios para capturar el comportamiento de cada etapa. El progreso se evaluará mediante la certificación de funcionamiento de cada módulo versus su contraparte en la simulación de LTspice.
- **Manufactura de carcasa:** por último, pero no menos importante, se procederá a la fabricación de la carcasa del sintetizador, esta servirá como protector y sección estética para el instrumento. Se busca que no sólo encapsule los módulos desarrollados en el presente proyecto, sino que también refleje su potencial artístico y expresivo. El progreso se medirá por el avance en la fabricación de carcasas de acuerdo con las especificaciones establecidas de estándar Eurorack [17], la evaluación de los aspectos estéticos y funcionales de la carcasa prototipo y el tiempo requerido para terminar la fabricación de carcasas e integración con componentes electrónicos.

Fuente de alimentación

Para este primer módulo llamado fuente de alimentación. se consideró la recomendación del trabajo realizado por Héctor de León [4], donde se menciona la implementación de supresión de ruido eléctrico en la alimentación del sistema. Para ello, se desarrolló una fuente de alimentación híbrida, la cual buscó mitigar el ruido de 60 Hz presente en la red eléctrica de Guatemala, esto mediante el uso de dos convertidores tipo Buck utilizando el integrado LM2596S, donde al ser módulos con una conmutación de 150 kHz seguirá presentando ruido eléctrico, con la diferencia que este estará fuera del rango audible de los usuarios.

8.1. Simulación en LTspice

Este diseño e implementación posee una etapa de transformación y rectificación como lo son las fuentes lineales, seguido del uso los dos convertidores DC-DC, nótese en Figura 30.

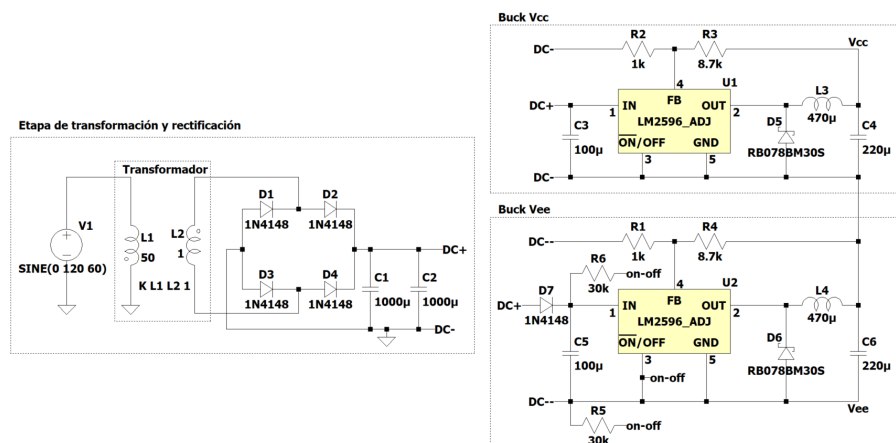


Figura 30: Esquemático fuente de alimentación

Tras correr un análisis transitorio del esquemático planteado en la Figura 30, se obtuvo una salida de voltaje simétrico de $\pm 12\text{ V}$ así como GND , nótese en Figura 31.

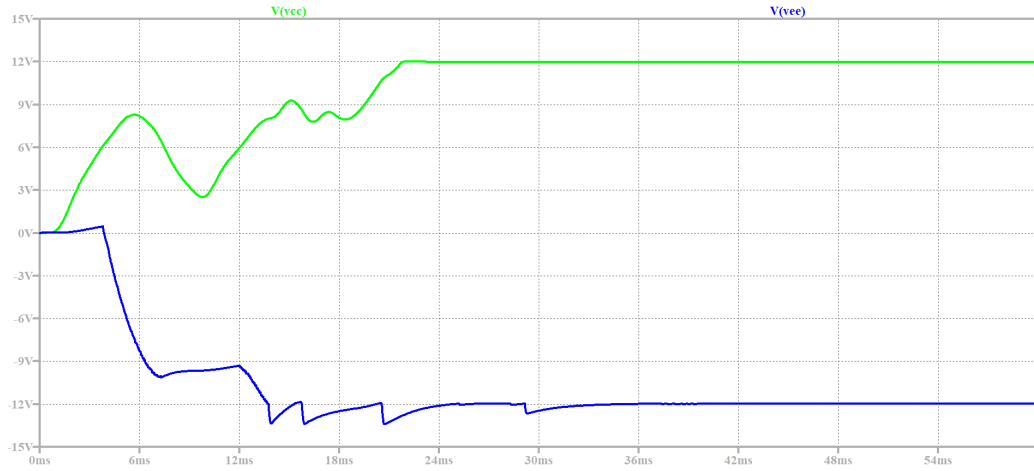


Figura 31: Análisis transitorio de fuente de alimentación

De igual forma, en la Figura 32 se presenta un análisis de Fourier para poder determinar el contenido frecuencial que presentó el sistema planteado.

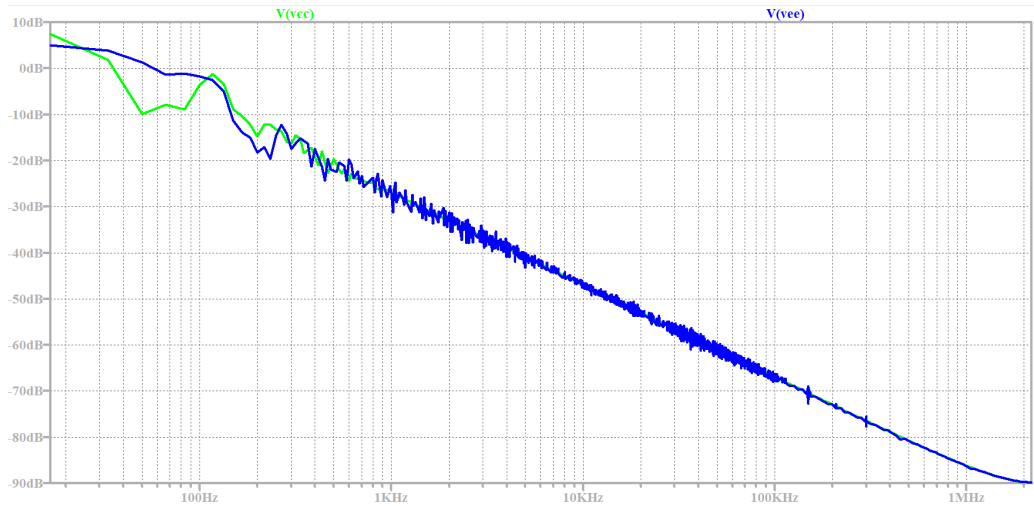


Figura 32: Análisis de Fourier de fuente de alimentación

8.2. Diseño del circuito en EasyEDA

Una vez certificado el funcionamiento por medio de la simulación, se procedió a utilizar el software especializado EasyEDA, donde primeramente se seleccionaron los componentes necesarios para el montaje del módulo, realizando nuevamente la topología del VCO con los componentes reales, nótese en Figura 33.

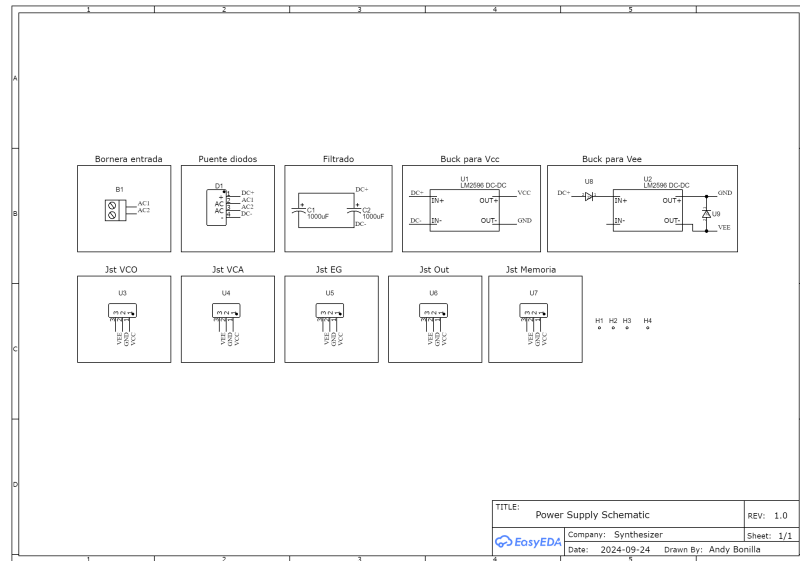


Figura 33: Esquemático VCO en EasyEDA

8.3. Diseño y fabricación de PCB

Seguidamente, a partir del esquemático planteado en la Figura 33, se procedió a diseñar y rutear la placa de circuito impreso (PCB), donde en la Figura 34 se muestra el *layout* en 2D del sistema.

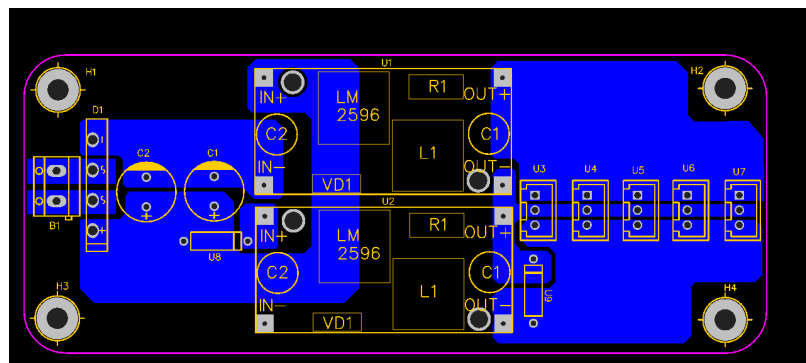


Figura 34: Vista 2D de PCB de la fuente de alimentación

Por otro lado, en la Figura 35 se muestra la vista 3D del PCB con los respectivos componentes:

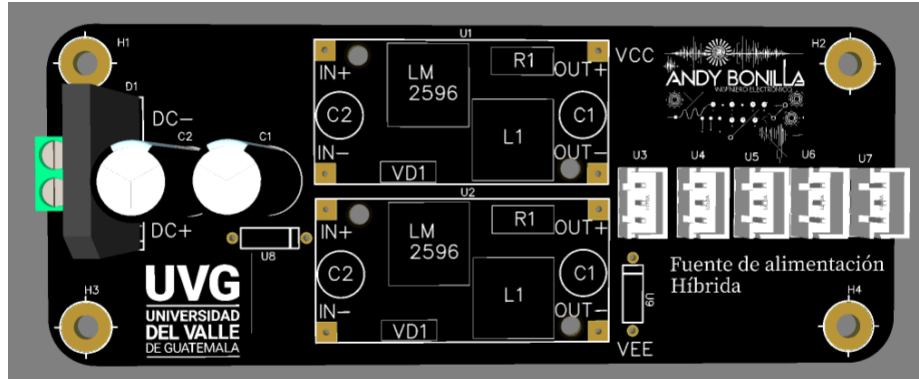


Figura 35: Vista 3D de PCB fuente de alimentación

8.4. Resultados

Tras culminar las etapas de simulación en LTspice para validar el correcto funcionamiento de la fuente de alimentación, se procedió al proceso de fabricación y soldadura de las placas por medio de JLCPCB, obteniendo una placa fabricada y ensamblada como se muestra en la Figura 36.

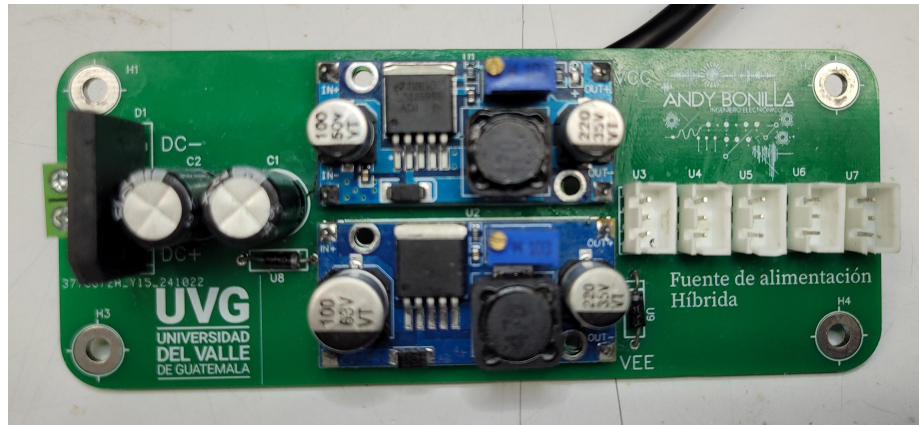


Figura 36: PCB físico ensamblado de fuente de alimentación

Seguidamente, se procedió a someter a pruebas reales, donde al igual que en la simulación se tomó realizó un análisis transitorio, se obtuvieron los voltajes simétricos de $\pm 12V$, nótese en Figura 37

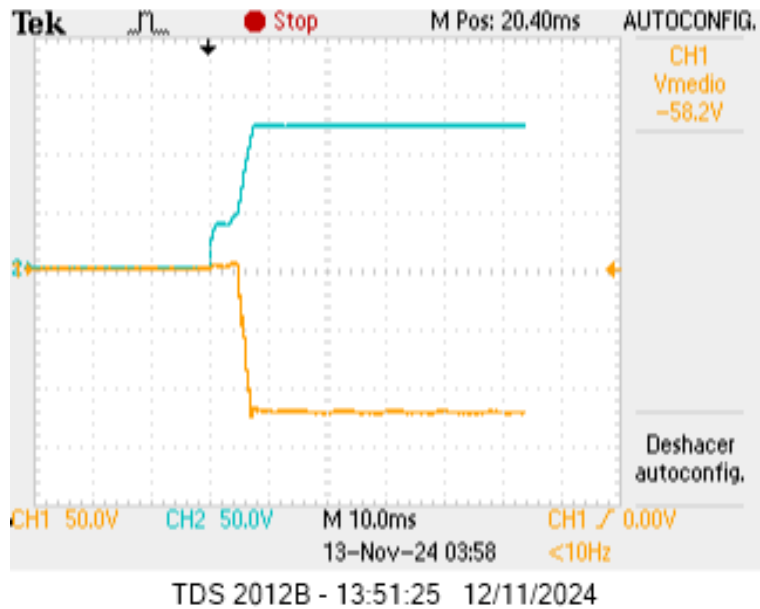


Figura 37: Análisis transitorio de fuente de alimentación

Por otro lado, en las Figuras 38 y 39, se sometió cada línea de alimentación a un análisis de Fourier para evaluar los armónicos presentes en la implementación real.

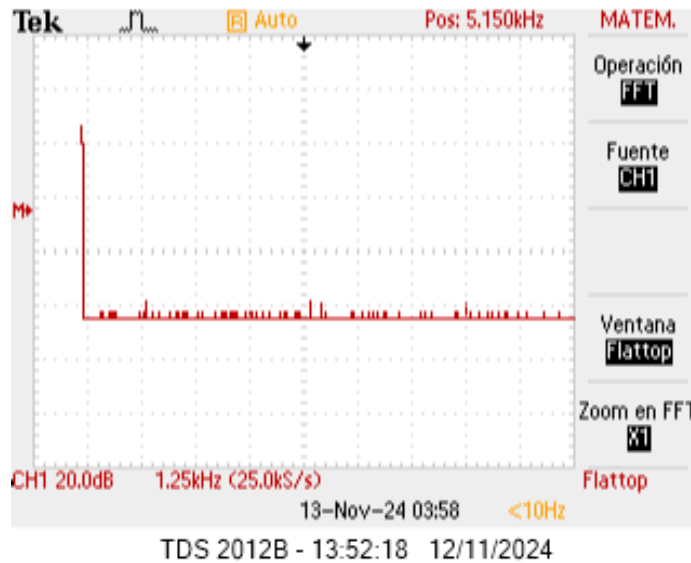


Figura 38: Análisis de Fourier de riel 12V

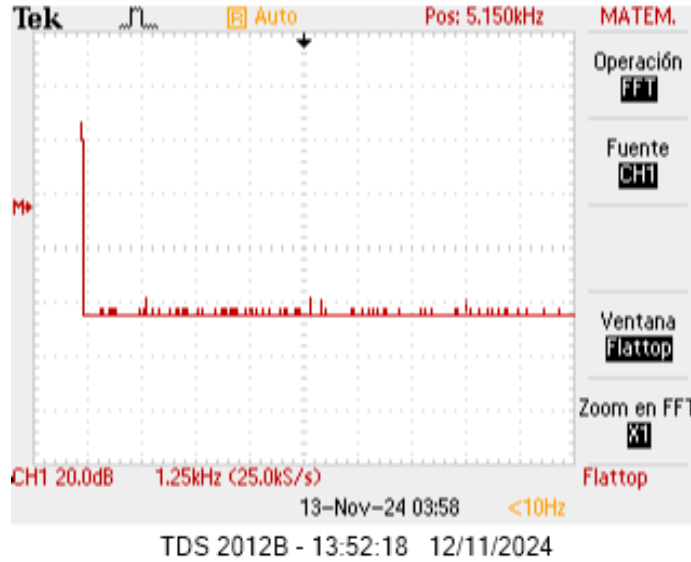


Figura 39: Análisis de Fourier de riel $-12V$

8.5. Discusión de resultados

Al momento de comparar el funcionamiento entre la topología simulada en la Figura 30 y la implementada en el PCB en la Figura 36, mostró resultados satisfactorios y fiables, pudiendo mantener un funcionamiento adecuado sin sobrecalentamiento ni cortes en la corriente; a pesar de contar con una simulación precisa y adecuada para el sistema, la fuente real tuvo una mejor respuesta durante el análisis transitorio, por lo tanto, incluso al contar con modelos aproximados en las simulaciones de LTspice, estos no tendrán un comportamiento exactamente igual al sistema real. Sin embargo, ya que el módulo fue diseñado específicamente para este sintetizador, sería conveniente considerar un aumento tanto en la cantidad de salidas como en la corriente de los convertidores tipo Buck, con el fin de asegurar una respuesta óptima de la fuente al incrementar la carga al momento de adicionar módulos al sintetizador. Además, ya que el ruido eléctrico esté fuera del rango audible contribuyó a mitigar el ruido de 60 Hz proveniente de la red eléctrica, haciendo más eficiente el módulo de alimentación y mejorando la experiencia del usuario.

Módulo oscilador controlado por voltaje (VCO)

9.1. Simulación en LTspice

Este módulo llamado oscilador controlado por voltaje, VCO, por sus siglas en inglés, fue tomado por el diseño planteado por Erica Synths y Moritz Klein [42], donde se utilizó la herramienta LTspice para poder simular el circuito (nótese Figura 40).

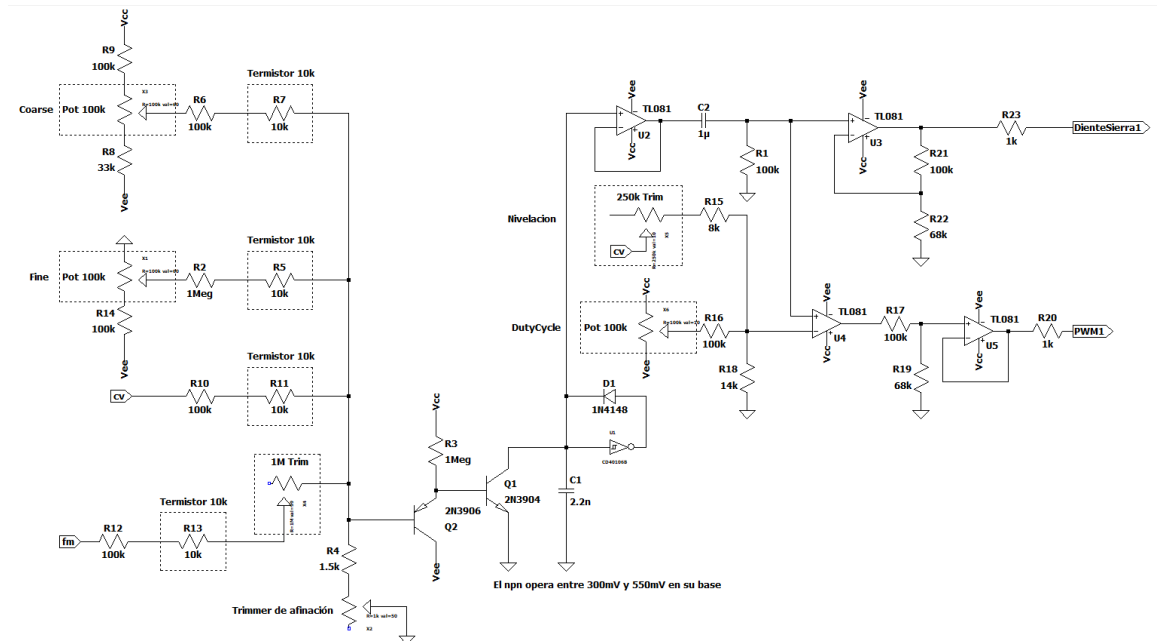


Figura 40: Topología oscilador controlador por voltaje

Donde a partir de la topología mostrada en la Figura 40, se verificó el funcionamiento de las múltiples salidas de este.

En primer lugar, se realizó una simulación donde se le inyectó un voltaje CV de 4.2 V, el cual permitió observar el comportamiento de circuito. Posteriormente, al graficar la señal de salida correspondiente a Diente de Sierra, se obtuvo la Figura 41

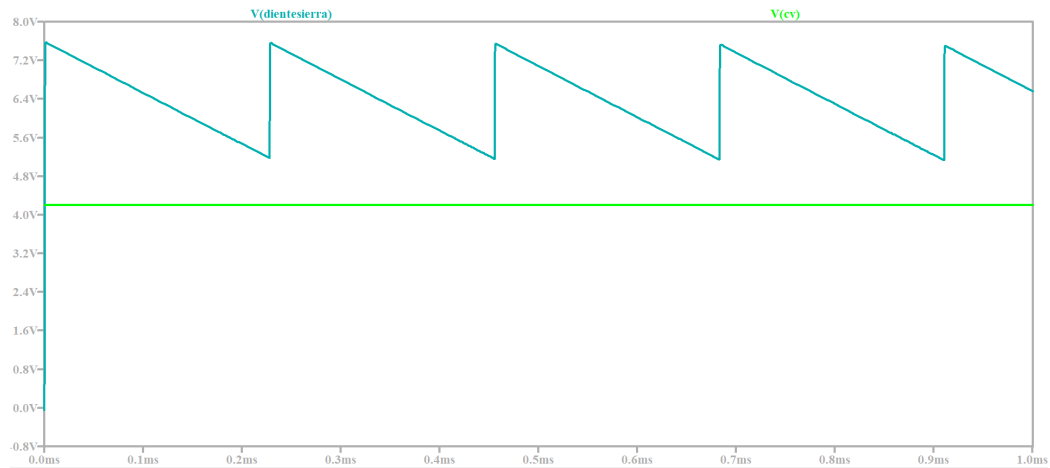


Figura 41: Salida simulada de diente de sierra

De manera similar, utilizando el mismo voltaje de control (CV) de 4.2 V, se generó la gráfica correspondiente a la señal de salida, la cual se puede observar en la Figura 42

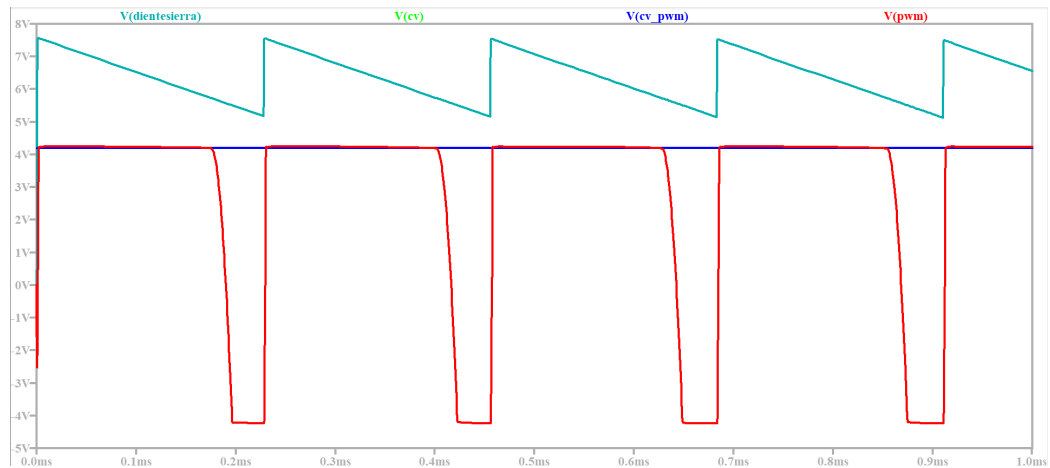


Figura 42: Salida simulada de PWM

9.2. Diseño del circuito en EasyEDA

Una vez certificado el funcionamiento por medio de la simulación, se procedió a utilizar el software especializado EasyEDA, donde primeramente se seleccionaron los componentes necesarios para el montaje del módulo, realizando nuevamente la topología del VCO con los componentes reales, nótese en Figura 43

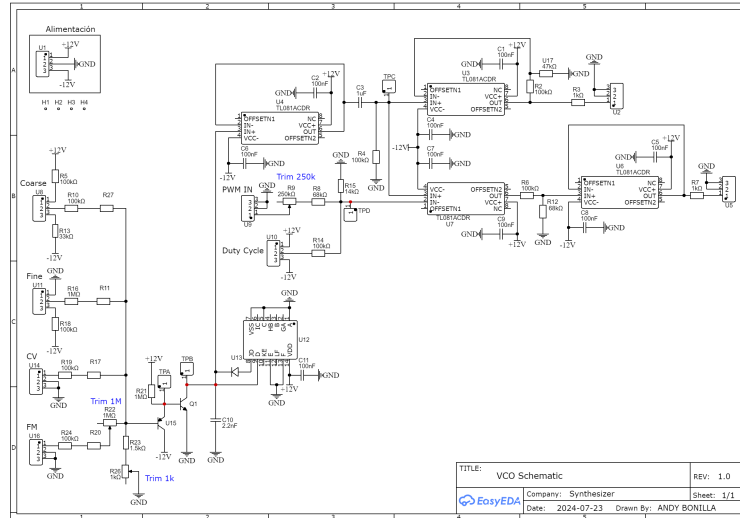


Figura 43: Esquemático VCO en EasyEDA

9.3. Diseño y fabricación de PCB

Seguidamente, a partir del esquemático planteado en la Figura 43, se procedió a diseñar y rutear la placa de circuito impreso (PCB), donde en la Figura 44 se muestra el *layout* en 2D del sistema.

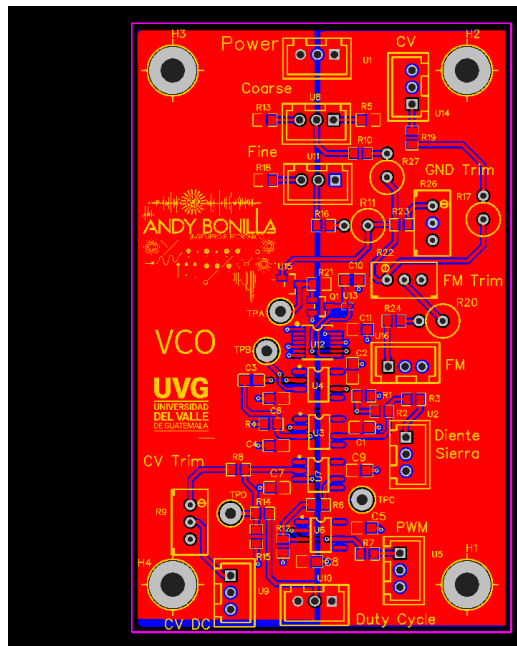


Figura 44: Vista 2D de PCB oscilador controlador por voltaje

Por otro lado, en la Figura 45 se muestra la vista 3D del PCB con los respectivos componentes:

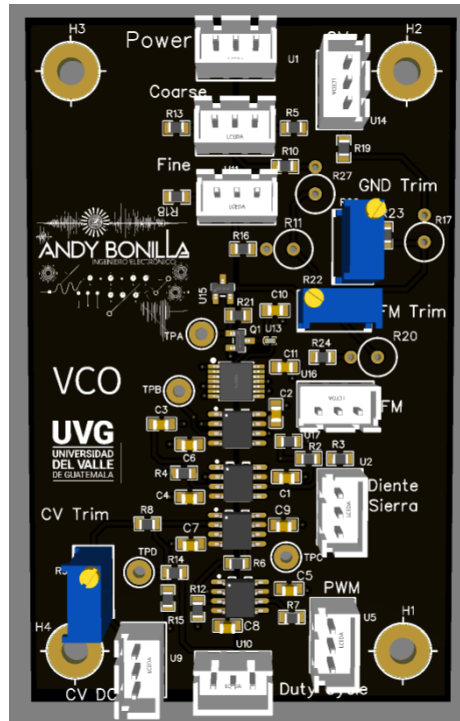


Figura 45: Vista 3D de PCB oscilador controlador por voltaje

Tras el proceso de fabricación y soldadura de las placas por medio de JLCPCB, se procedió a solicitar la producción final de los PCBs a la. A continuación, se adjunta una imagen de la placa real fabricada, como se muestra en la Figura 46

9.4. Resultados

Tras culminar las etapas de simulación en LTspice para validar el correcto funcionamiento del oscilador controlado por voltaje (VCO), se procedió al proceso de fabricación y soldadura de las placas por medio de JLCPCB, obteniendo una placa fabricada y ensamblada como se muestra en la Figura 46.



Figura 46: PCB físico ensamblado de VCO

Al contar con la placa fabricada y ensamblada, se procedió a someter a pruebas reales, donde al igual que en la simulación se le inyectó un voltaje CV de 4.2V, el cual permitió observar el comportamiento de circuito. Posteriormente, al graficar la señal de salida correspondiente a diente de sierra y ciclo de trabajo, se obtuvo la Figura 47.

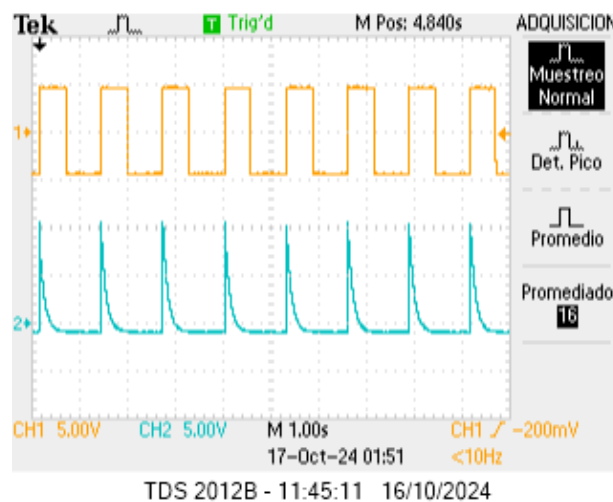


Figura 47: Medición en osciloscopio de salida de placa de oscilador controlador por voltaje

9.5. Discusión de resultados

Se obtuvieron los resultados esperados en forma de onda de diente de sierra y PWM, con una alta precisión entre simulación (nótese Figura 42) y la implementación física del circuito (nótese en Figura 47). En contraste, cabe mencionar que para mejorar la experiencia del usuario, es vital calibrar de forma adecuada los potenciómetros, tanto regulares como de precisión, para así ajustar los parámetros de los módulos de manera adecuada, como una alta precisión en la frecuencia esperada, tono, etc. Asimismo, es vital comentar la importancia de la correcta polarización de los transistores es un aspecto fundamental en el diseño de circuitos, ya que garantiza su funcionamiento óptimo y previene problemas que afectan gravemente el desempeño de las distintas etapas de la topología y, en consecuencia, requerir reprocesos en la fabricación de las PCB, lo que aumenta los costos y el tiempo de producción.

Módulo amplificador controlado por voltaje (VCA)

10.1. Simulación en LTspice

Seguidamente, este otro módulo llamado amplificador controlado por voltaje, VCA, por sus siglas en inglés, se consideró la topología planteada por Erica Synths y Moritz Klein [21], nótese en Figura 48.

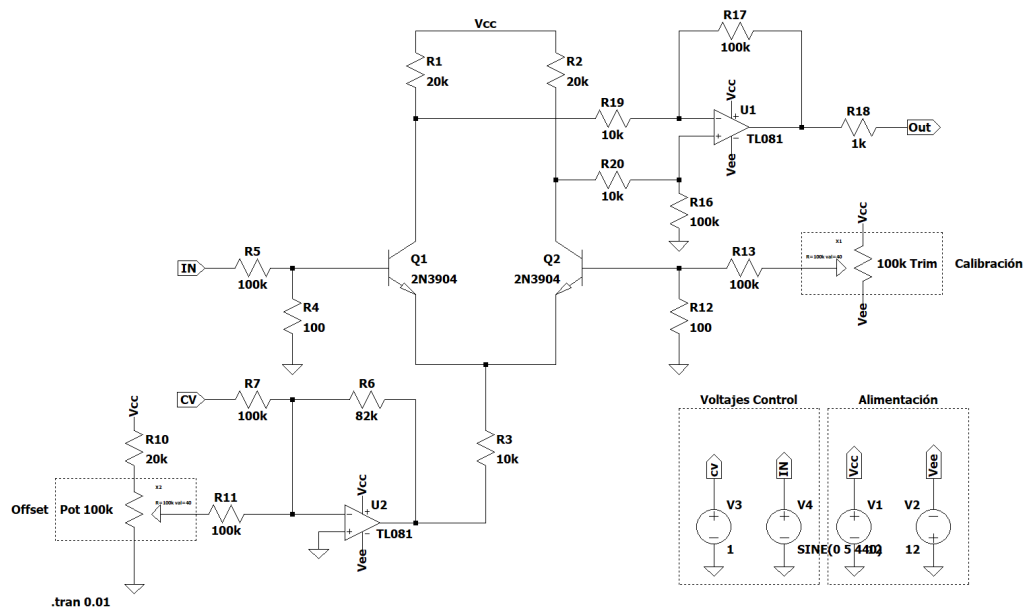


Figura 48: Topología amplificador controlador por voltaje

Donde a partir de la topología mostrada en la Figura 48, se verificó el funcionamiento de las múltiples salidas de este.

En primer lugar, se realizó una simulación donde se le inyectó un voltaje CV una onda senoidal con amplitud 5 V y una frecuencia de 20 Hz , mientras que la señal de entrada (In) se utilizó un PWM con un 50% de ciclo de trabajo, nótese en Figura 49

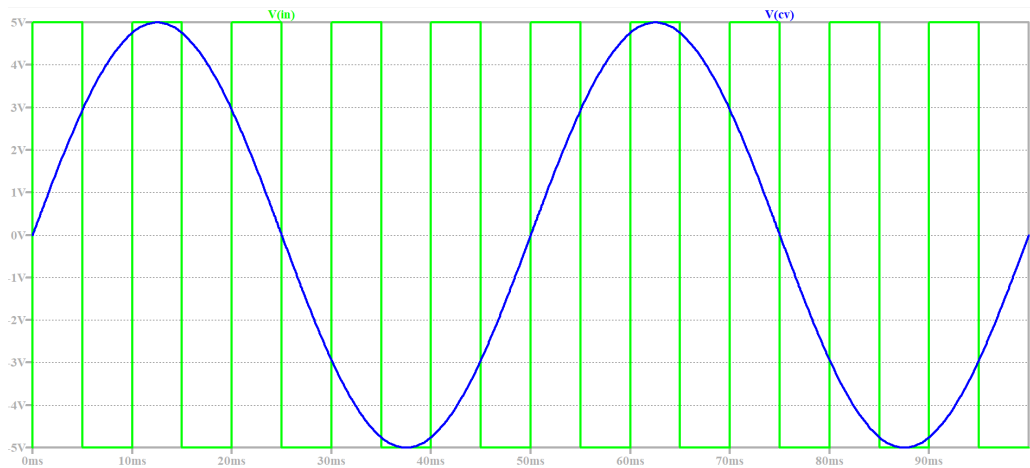


Figura 49: Señales simuladas de entrada a VCA

Teniendo ambas señales de entrada, se procede a graficar la salida de este módulo, como se muestra en la Figura 50

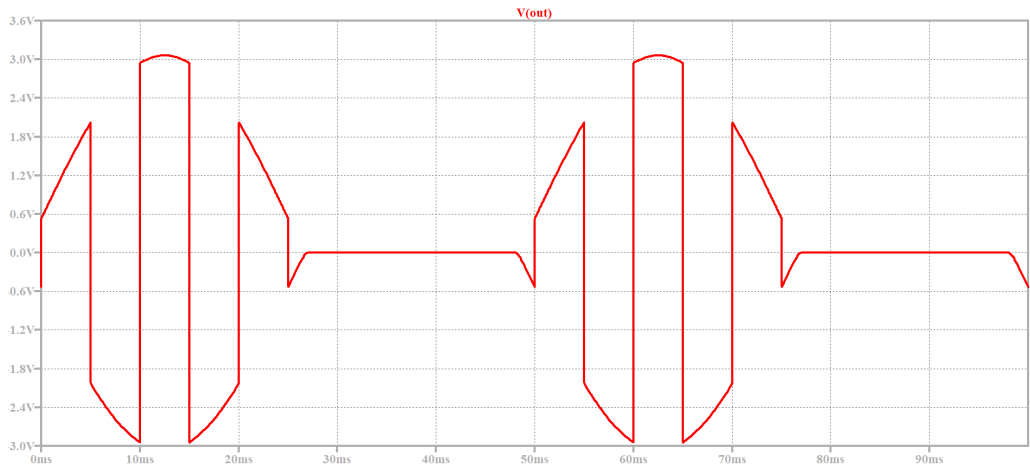


Figura 50: Señal simulada de salida de VCA

10.2. Diseño del circuito en EasyEDA

Una vez certificado el funcionamiento por medio de la simulación, se procedió a utilizar el software especializado EasyEDA, donde primeramente se seleccionaron los componentes necesarios para el montaje del módulo, realizando nuevamente la topología del VCA con los componentes reales, nótese en Figura 51

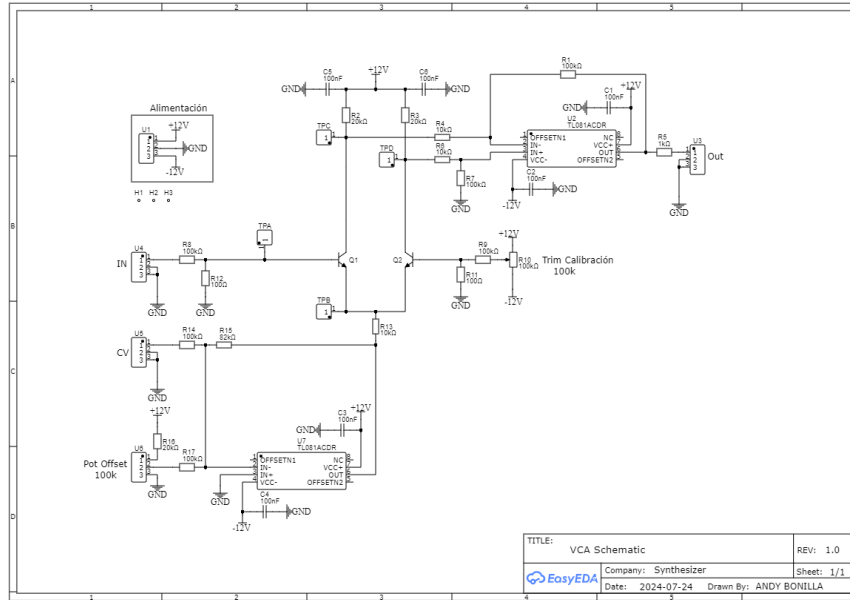


Figura 51: Esquemático VCA en EasyEDA

10.3. Diseño y fabricación de PCB

Seguidamente, a partir del esquemático planteado en la Figura 51, se procedió a diseñar y rutear la placa de circuito impreso (PCB), donde en la Figura 44 se muestra el *layout* en 2D del sistema.

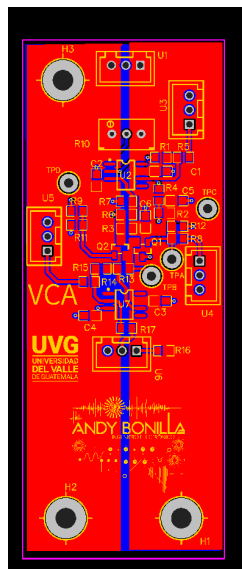


Figura 52: Vista 2D de PCB amplificador controlador por voltaje

Por otro lado, en la Figura 53 se muestra la vista 3D del PCB con los respectivos componentes:

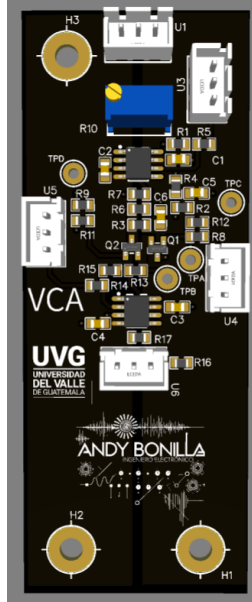


Figura 53: Vista 3D de PCB amplificador controlador por voltaje

10.4. Resultados

Tras culminar las etapas de simulación en LTspice para validar el correcto funcionamiento del amplificador controlador por voltaje (VCA), se procedió al proceso de fabricación y soldadura de las placas por medio de JLCPCB, obteniendo una placa fabricada y ensamblada como se muestra en la Figura 54.



Figura 54: PCB físico ensamblado de VCA

Al contar con la placa fabricada y ensamblada, se procedió a someter a pruebas reales, donde al igual que en la simulación se le inyectó un voltaje CV una onda senoidal con amplitud 5 V y una frecuencia de 20 Hz , mientras que la señal de entrada (I_n) se utilizó un PWM con un 50% de ciclo de trabajo, nótese en Figura 55.

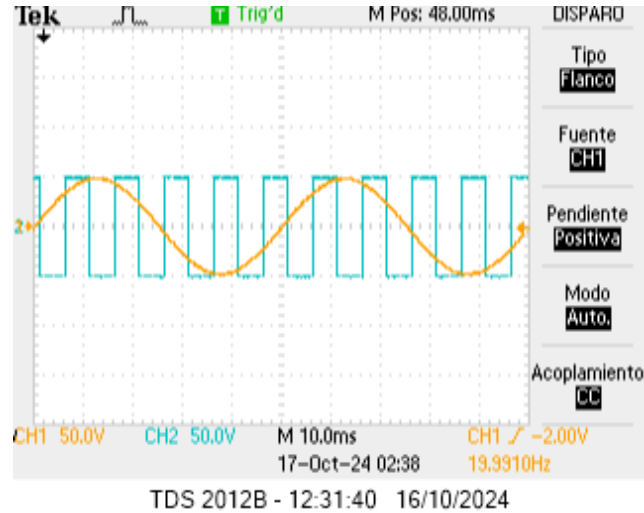


Figura 55: Medición en osciloscopio de las entradas de placa de amplificador controlador por voltaje

Por otro lado, al tener ambas señales de entrada, se procede a graficar la salida de este módulo, como se muestra en la Figura 56.

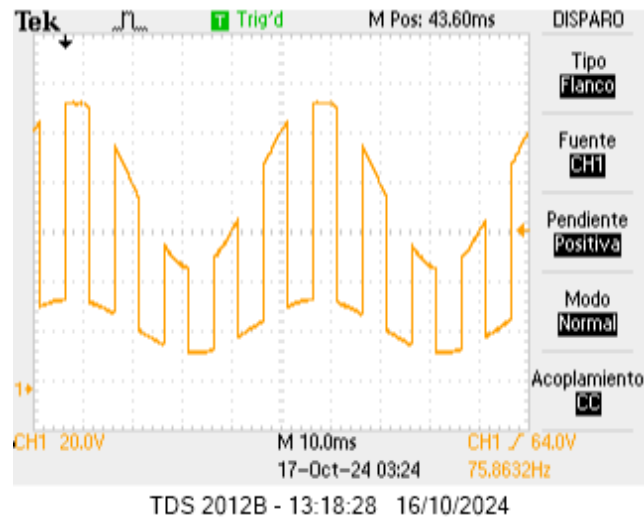


Figura 56: Entrada de placa de amplificador controlador por voltaje

10.5. Discusión de resultados

Considerando los resultados teóricos mostrados en la Figura 50, junto con los datos experimentales de la Figura 56, se identificó como principal diferencia el comportamiento dinámico del sistema real. En la simulación realizada en LTspice, la topología mostró únicamente un comportamiento estático, estando limitado a las condiciones iniciales de simulación y sin representar todas las posibles variaciones en el tiempo, inclusive al considerar las tolerancias de los componentes en el programa. Sin embargo, en la implementación física, se observaron múltiples fluctuaciones y variaciones en la respuesta debido a factores como la respuesta en frecuencia de los componentes y la influencia de la carga en el circuito.

De igual forma, en la señal experimental de la Figura 56 se observan diferencias en la precisión de las ondas de diente de sierra y PWM, especialmente en cuanto a amplitud y estabilidad. No obstante, estas discrepancias pueden deberse a las tolerancias de los componentes y a las limitaciones de los convertidores utilizados en el sistema. A pesar de estas diferencias, la señal experimental mantiene una precisión alta, sin generar calentamientos, saturación ni recortes de corriente en el circuito, por tal razón, se asegura que el comportamiento del sistema cumple con las expectativas de diseño planteadas en la simulación, aunque se recomienda optimizar la configuración para mejorar la respuesta dinámica en futuras implementaciones.

Módulo generador envolvente (EG)

11.1. Simulación en LTspice

Por otro lado, el presente módulo llamado generador envolvente, EG por sus siglas en inglés fue tomado por el diseño planteado por Erica Synths y Moritz Klein [43], donde se utilizó la herramienta de LTspice para poder simular el circuito (nótese en Figura 57).

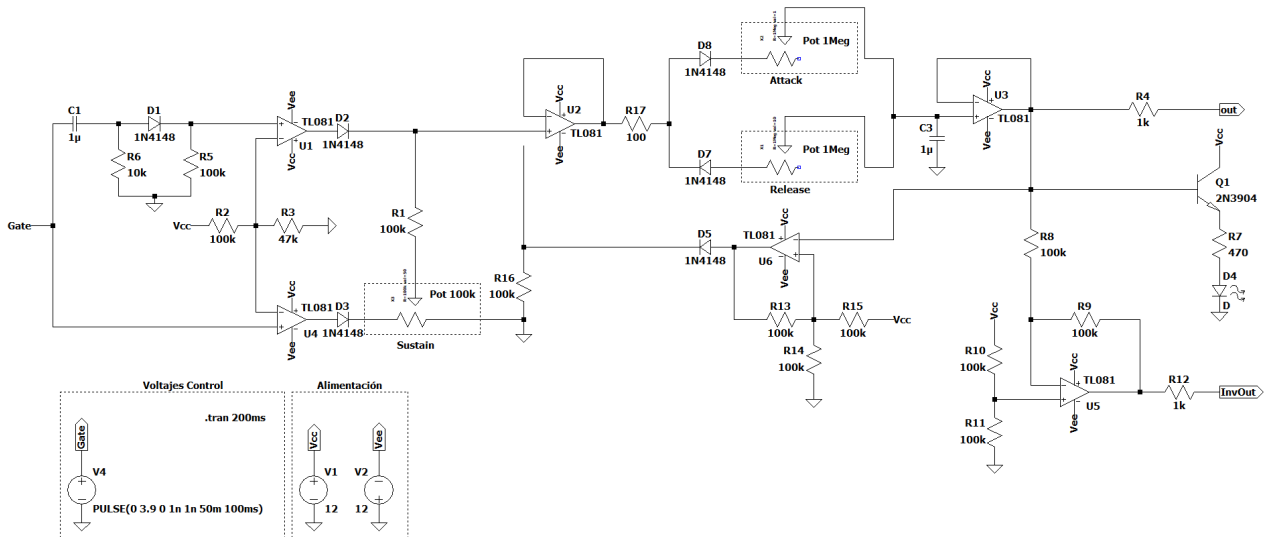


Figura 57: Topología generador envolvente

Donde a partir de la topología mostrada en la Figura 40, se verificó el funcionamiento de las múltiples salidas de este.

En primer lugar, se le inyectó un V_{Gate} con una señal cuadrada a 10 Hz , el cual permitió observar el comportamiento de circuito. Posteriormente, al graficar la señal de entrada (V_{Gate}), la salida y la salida invertida, se obtuvo la Figura 58.

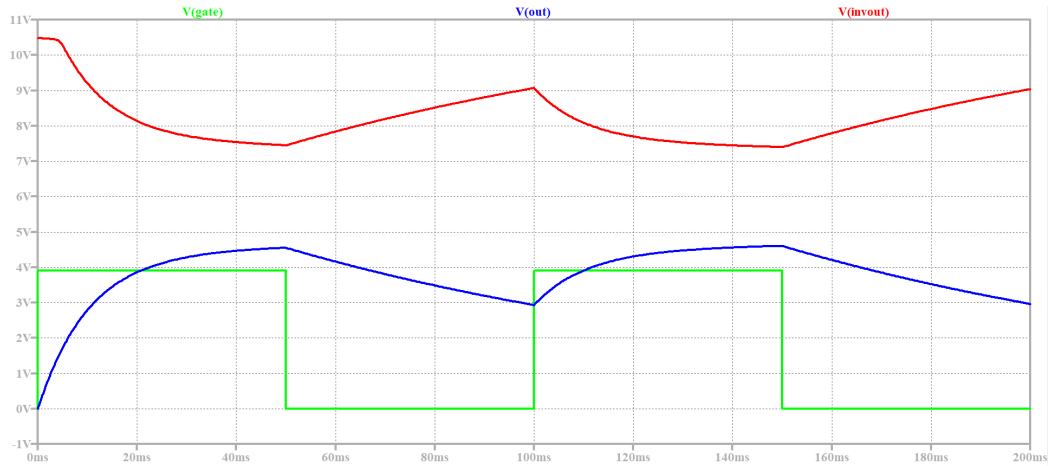


Figura 58: Salida simulada de generador envolvente

11.2. Diseño del circuito en EasyEDA

Una vez certificado el funcionamiento por medio de la simulación, se procedió a utilizar el software especializado EasyEDA, donde primeramente se seleccionaron los componentes necesarios para el montaje del módulo, realizando nuevamente la topología del generador envolvente con los componentes reales, nótese en Figura 59.

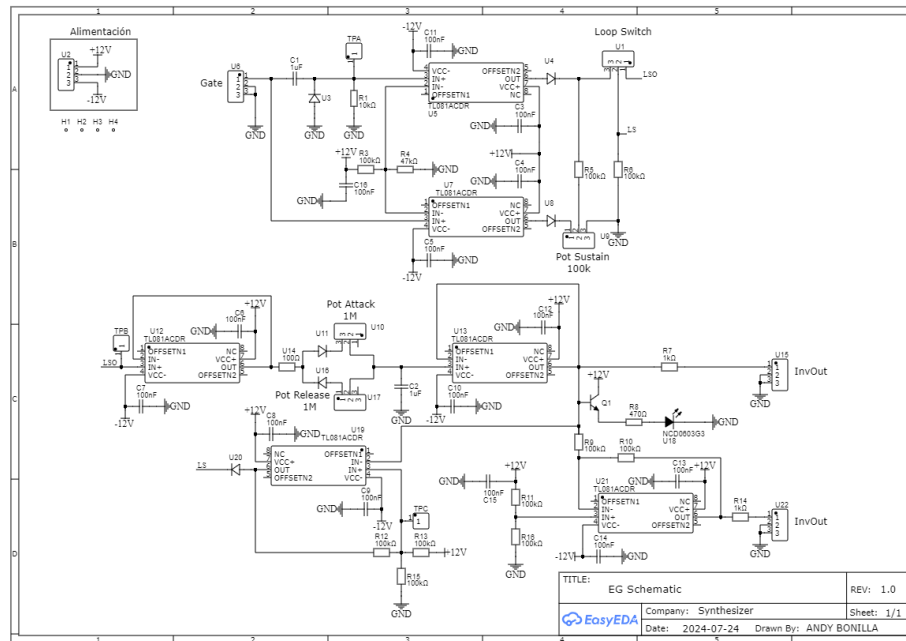


Figura 59: Esquemático EG en EasyEDA

11.3. Diseño y fabricación de PCB

Seguidamente, a partir del esquemático planteado en la Figura 59, se procedió a diseñar y rutear la placa de circuito impreso (PCB), donde en la Figura 60 se muestra el *layout* en 2D del sistema.

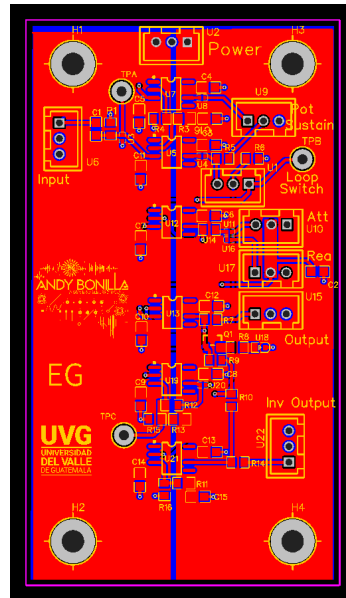


Figura 60: Vista 2D de PCB generador envolvente

Por otro lado, en la Figura 61 se muestra la vista 3D del PCB con los respectivos componentes:

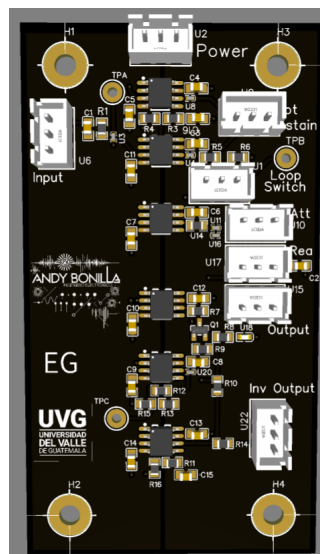


Figura 61: Vista 3D de PCB generador envolvente

11.4. Resultados

Tras culminar las etapas de simulación en LTspice para validar el correcto funcionamiento del generador envolvente (EG), se procedió al proceso de fabricación y soldadura de las placas por medio de JLCPCB, obteniendo una placa fabricada y ensamblada, como se muestra en la Figura 62.

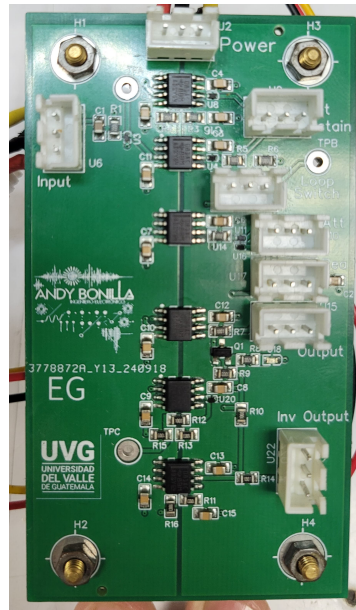


Figura 62: PCB físico ensamblado de EG

Al contar con la placa fabricada y ensamblada, se procedió a someter a pruebas reales, donde en primer lugar, se le inyectó un V_{Gate} con una señal cuadrada a 10 Hz , nótese en Figura 63.

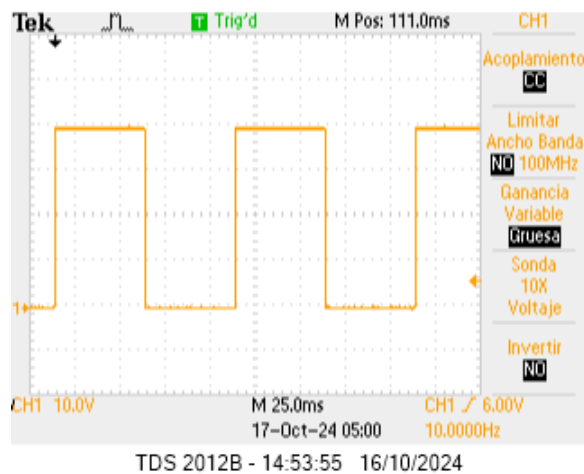


Figura 63: Medición en osciloscopio de la entrada de placa de generador envolvente (EG)

Por otro lado, al tener ya la señal de entrada, se procede a graficar en un osciloscopio la salida de este módulo como se muestra en la Figura 64.

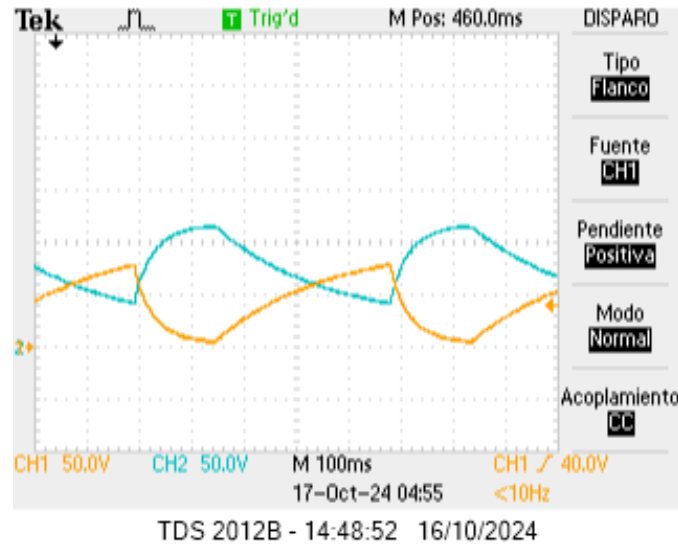


Figura 64: Medición en osciloscopio de la salida de placa de generador envolvente (EG)

11.5. Discusión de resultados

A pesar de no ser un módulo con tanta robustez", como lo menciona el autor, comparado con los generadores envolvente presentes en la industria, este módulo ha demostrado ofrecer resultados satisfactorios y una respuesta adecuada en todas las aplicaciones a las que fue sometido. Su diseño simplificado permite un desempeño muy fiable en configuraciones estándar, ya que una de sus grandes ventajas es la incorporación de dos salidas, siendo la señal original y una señal invertida, proporcionando una mejor experiencia al usuario. Esta característica amplía significativamente las posibilidades de configuración, permitiendo combinar ambas salidas para crear efectos de modulación y variaciones en la envolvente de la señal al experimental con la síntesis de audio, enriqueciendo la experiencia sonora. Dada esta flexibilidad, el módulo ofrece al usuario una mayor variedad de opciones creativas, optimizando su integración en el sintetizador y agregando valor al conjunto del sistema.

12.1. Simulación en LTspice

Continuando, este módulo es el encargado de acoplar el nivel de salida del ecualizador para dispositivos de uso cotidiano, donde fue tomado por el diseño planteado por Erica Synths y Moritz Klein [44], donde se utilizó la herramienta LTspice para poder simular el circuito (nótese Figura [65]).

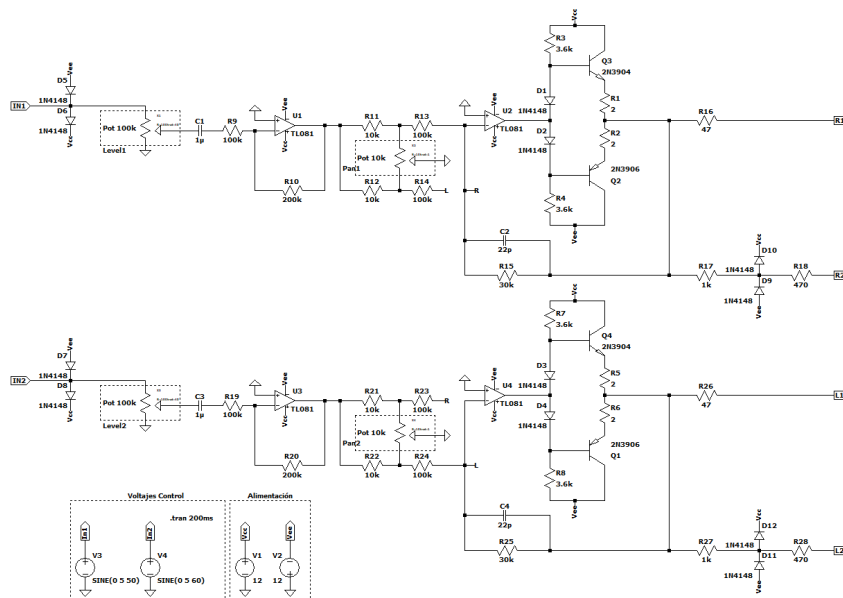


Figura 65: Topología etapa de salida y paneo

Donde a partir de la topología mostrada en la Figura [65], se verificó el funcionamiento de las múltiples salidas de este.

Para poder verificar su funcionamiento, se le inyectan dos ondas senoidales, una con una frecuencia de 50 Hz y otra 60 Hz , donde ambos potenciómetros de paneo se orientan al canal izquierdo, donde en la Figura 66 se muestra la superposición de ambas señales de entrada con su respectiva inclinación al canal izquierdo (L).

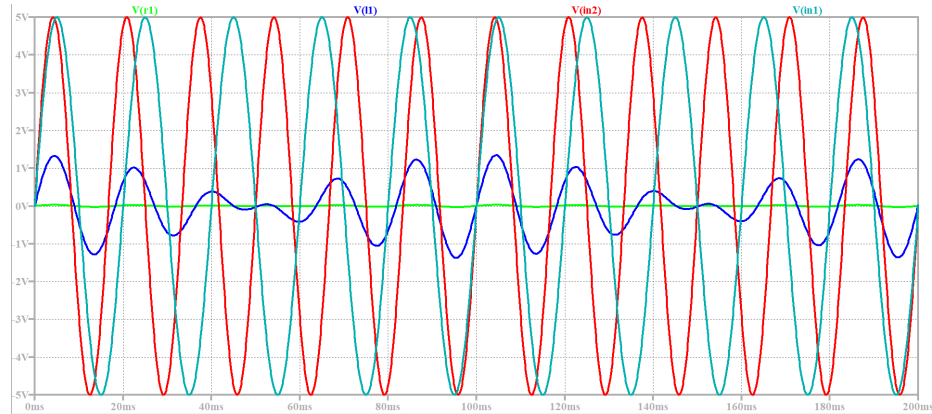


Figura 66: Salida simulada de diente de sierra

12.2. Diseño y fabricación de PCB

Seguidamente, a partir del esquemático planteado en la Figura 66, se procedió a diseñar y rutear la placa de circuito impreso (PCB), donde en la Figura 67 se muestra el *layout* en 2D del sistema.

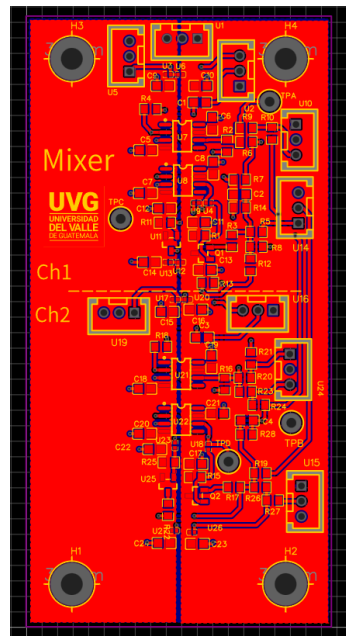


Figura 67: Vista 2D de PCB salida

Por otro lado, en la Figura 68 se muestra la vista 3D del PCB con los respectivos componentes:

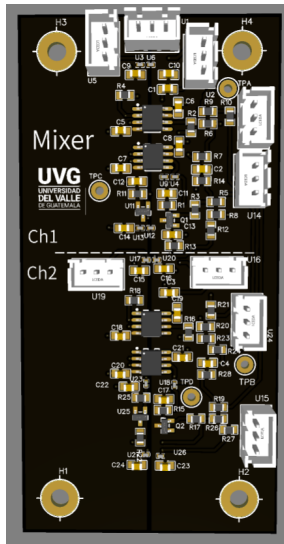


Figura 68: Vista 3D de PCB salida

12.3. Funcionamiento

Tras culminar las etapas de simulación en LTspice para validar el correcto funcionamiento del módulo de salida, se procedió al proceso de fabricación y soldadura de las placas por medio de JLCPCB, obteniendo una placa fabricada y ensamblada como se muestra en la Figura [69](#).

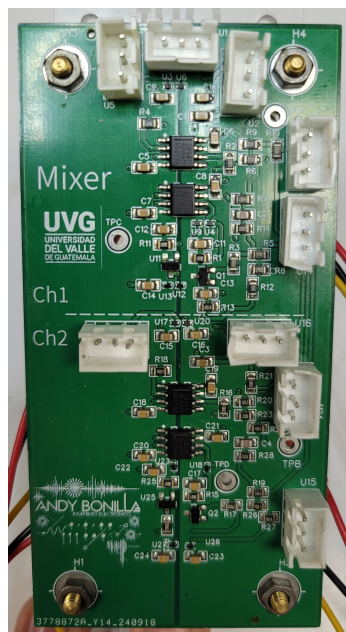


Figura 69: PCB físico ensamblado de salida

Al contar con la placa fabricada y ensamblada, se le inyectan dos ondas senoidales, una con una frecuencia de 50Hz y otra 60Hz , nótese en Figura 70

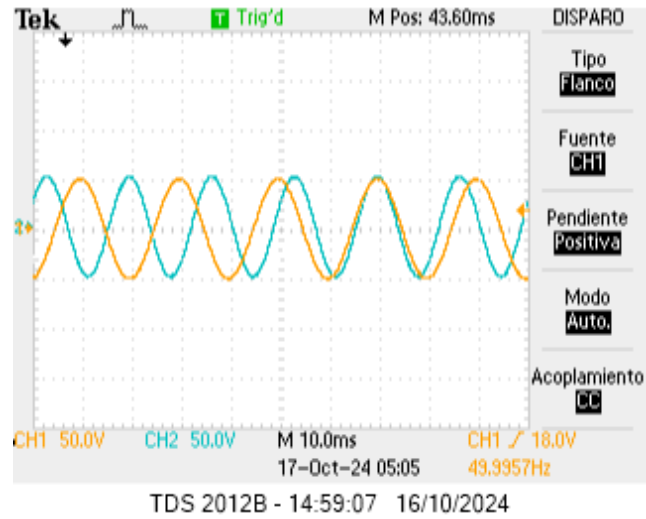


Figura 70: Medición en osciloscopio de las entradas de placa de módulo de salida

Por otro lado, se orientaron ambos potenciómetros de paneo al canal izquierdo, donde en la Figura 66 se muestra la superposición de ambas señales de entrada con su respectiva inclinación al canal izquierdo (L)

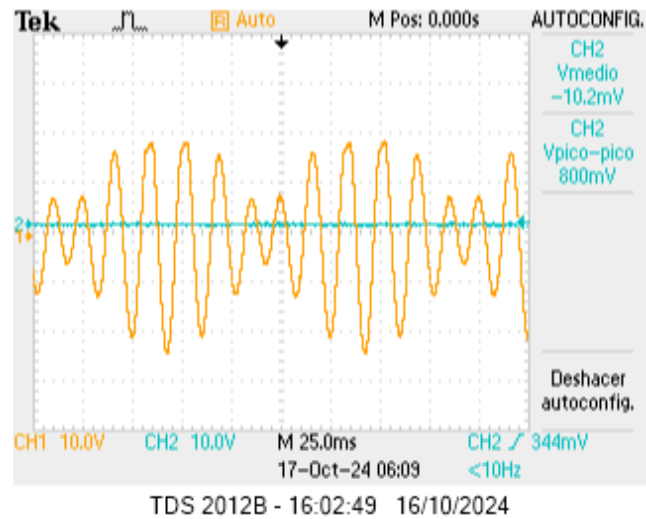


Figura 71: Medición en osciloscopio de las salidas de placa de módulo de salida

12.4. Discusión de resultados

Este módulo presentó un desempeño adecuado en las pruebas realizadas, verificándose el control de intensidad, panning y amplitud de salida para un uso correcto en equipos comerciales y domésticos, siendo estos bocinas y audífonos de uso diario. Cabe mencionar que la capacidad de ajustar estos parámetros permite que el módulo se adapte bien a diversas configuraciones de audio, ofreciendo una experiencia de alta calidad en diferentes contextos de reproducción según lo requiera el usuario. Sin embargo, aunque el diseño actual cuenta con dos canales provenientes de proyectos previos, se recomienda considerar la implementación de un mezclador que integre estas mismas capacidades (control de intensidad, panning y amplitud de salida). Esto permitiría una mayor versatilidad al sistema, permitiendo gestionar múltiples señales de forma más eficiente y ampliando las posibilidades de mezclar múltiples canales dentro del mismo sintetizador.

Módulo de memoria de configuraciones

Para el desarrollo de este último módulo, denominado memoria de configuraciones, se tuvo en consideración la creciente tendencia en la electrónica moderna de permitir al usuario fijar y personalizar parámetros específicos, pudiéndolos almacenar para su posterior consulta y reutilización. Este tipo de funcionalidades son muy útiles en sistemas complejos como lo son los sinterizadores, donde el guardar configuraciones del usuario mejora la replicación de sonidos y experiencia del usuario. Por lo tanto, este módulo se diseñó con el fin de capturar, almacenar y recuperar estos parámetros; alineándose con los avances tecnológicos actuales.

Para poder visualizar de mejor manera la estructura y funcionamiento de este módulo, se tomó como base la implementación de un considerando la arquitectura mostrada en la Figura 25 para así utilizar un microcontrolador para tomar lectura de la posición de un potenciómetro, almacenarlo y garantizar retornar el valor guardado. Al acoplarlo al funcionamiento del presente, se presentan las configuraciones que se muestran a continuación:

- **Inserción de configuraciones de usuario (guardar):** en la Figura 72 se propone un diagrama de bloques que representa la interacción del usuario con los componentes del módulo, el cual puede variar posicionar el potenciómetro de resonancia en una posición dada, donde al presionar el botón guardar es posible leer el valor de un convertidor analógico digital (ADC) y guardarlo en memoria EEPROM.

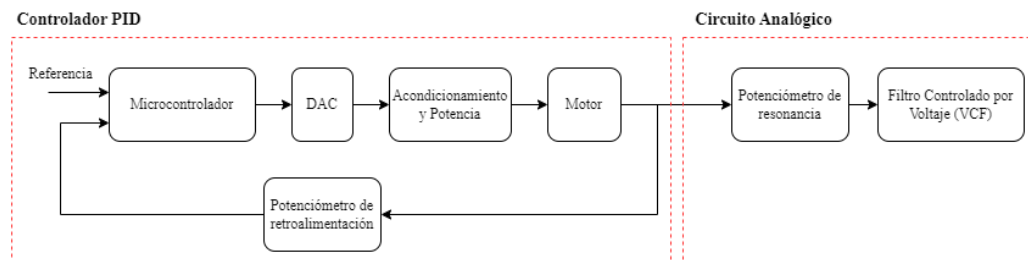


Figura 72: Diagrama de bloques para inserción de configuraciones

- **Recuperación de configuración previa (replicar):** por otro lado, en la Figura 73 se propone de igual forma un diagrama de bloques que representa la interacción del usuario con los componentes del módulo, el cual al presionar el botón replicar se extrae el valor previamente guardado en EEPROM y se toma este valor como referencia dentro de un controlador PI para poder regresar al valor deseado.

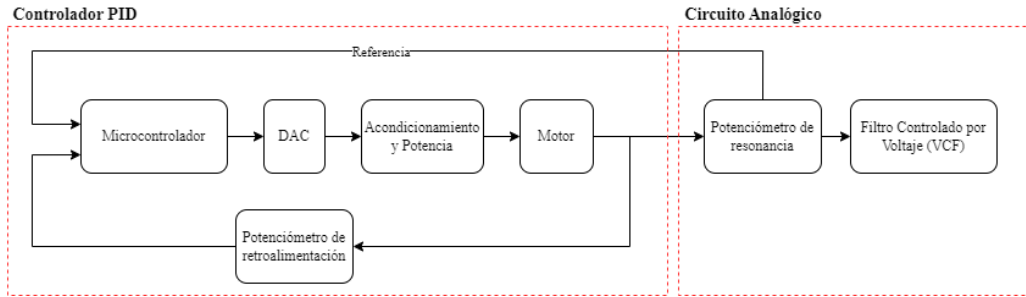


Figura 73: Diagrama de bloques para inserción de configuraciones

13.1. Simulación en LTspice

A continuación, se presentan las simulaciones de los dos subcircuitos clave para el módulo de memoria de configuraciones.

13.1.1. Simulación de filtro controlado por voltaje (VCF)

Primeramente, este módulo buscó la implementar un filtro controlado por voltaje, VCF por sus siglas en inglés, el cual fue tomado de la subsección de Resonancia variable [45], donde se utilizó la herramienta LTspice para poder simular el circuito (nótese Figura 74).

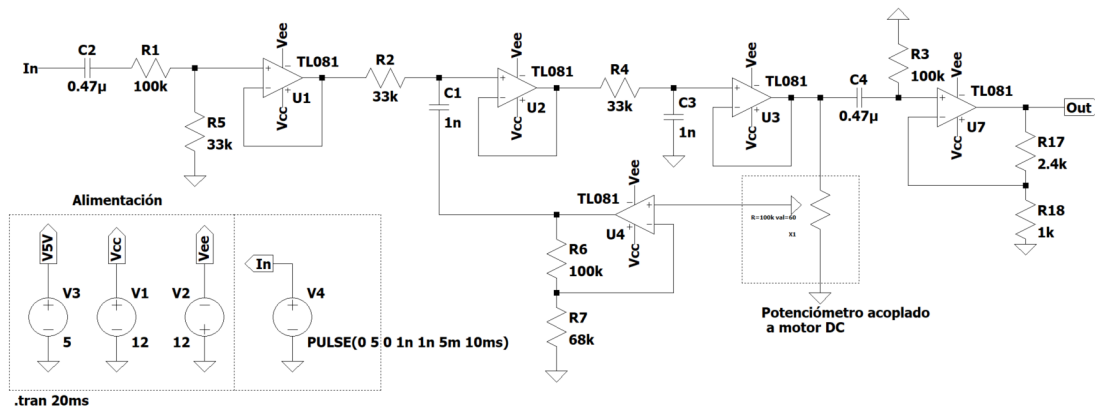


Figura 74: Topología filtro controlado por voltaje

Donde para poder verificar su funcionamiento se le inyectó una onda cuadrada de 100 Hz con amplitud de 5 V , el cual permitió observar el comportamiento de circuito (nótese en Figura 75).

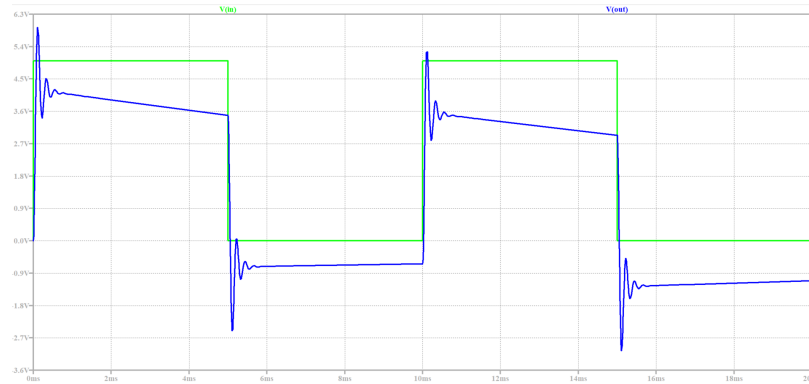


Figura 75: Superposición de entrada y salida en filtro controlado por voltaje

13.1.2. Simulación de PID

Por otro lado, para poder guardar y recuperar las configuraciones de los usuarios fue necesario implementar un Sistema de control con un controlador PID digital, considerando la arquitectura mostrada en la Figura 25. Sin embargo, ya que la planta del sistema la conforma un motor DC acoplado a un potenciómetro para poder tener retroalimentación de su posición, fue necesario diseñar una etapa de acondicionamiento de la señal. En el circuito mostrado en la Figura 76 se muestra un circuito que garantiza que el sistema conserve su linealidad respectiva para que el controlador PID funcione sin problemas bajo los principios de sistemas LTI. Para ello, se toma la señal que brinda el DAC la cual está en un rango de operación entre 0 V y 5 V , convirtiéndola en una señal de -5 V a 5 V para poder así controlar la dirección de giro del motor. Por lo tanto, a continuación se explican los detalles de la topología:

1. **Divisor de voltaje y match de impedancias:** se toma un divisor de voltaje con factor de 0.5 para poder tomar un voltaje de referencia de 2.5 V , seguido de un amplificador operacional en configuración de seguidor de voltaje, esto con el fin de tener una baja impedancia de salida hacia la siguiente etapa.
2. **Amplificador restador:** el objetivo de esta parte es poder tomar como referencia el valor proveniente de la etapa anterior, para compararlo con el rango de $[0\text{ V}, 5\text{ V}]$ que brinda el DAC, donde al amplificar únicamente la diferencia entre ellas, permitiendo al motor operar en un rango de $[-5\text{ V}, 5\text{ V}]$ para girar en una dirección u otra.
3. **Push-pull con retroalimentación:** teniendo ya el rango de voltaje de operación esperado para el motor, se procede a una etapa de potencia, diseñada para amplificar la corriente de la señal de control que moverá al motor, utilizando transistores TIP41C, TIP42C y diodos de protección.

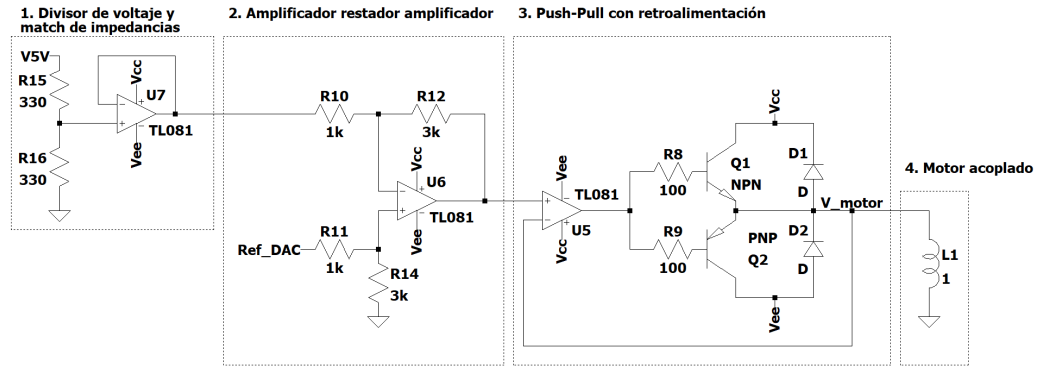


Figura 76: Topología en etapa de acondicionamiento

Donde, para poder verificar que se encuentre en el rango deseado de voltaje de $\pm 5 V$, se le inyectó una señal cuadrada con una frecuencia de $100 Hz$, donde al graficar la salida se obtiene la Figura [77](#).

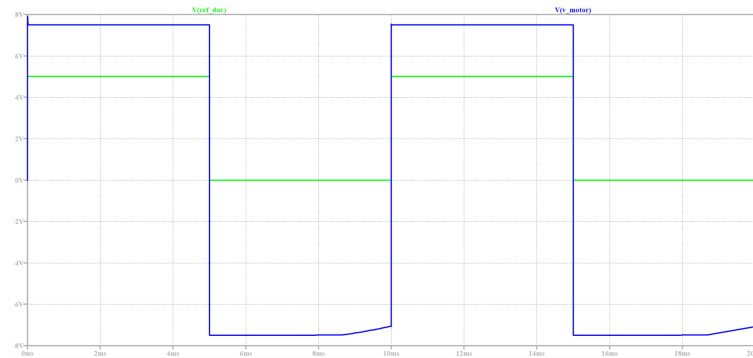


Figura 77: Superposición de entrada y salida en etapa de acondicionamiento

13.2. Diseño del circuito en EasyEDA

Una vez certificado el funcionamiento por medio de la simulación, se procedió a utilizar el software especializado EasyEDA, donde primeramente se seleccionaron los componentes necesarios para el montaje del módulo, realizando nuevamente las topologías correspondientes, como se lista a continuación:

13.2.1. Filtro controlado por voltaje (VCF)

Se procedió a realizar nuevamente la topología del VCF con los componentes reales, nótese en Figura [78](#).

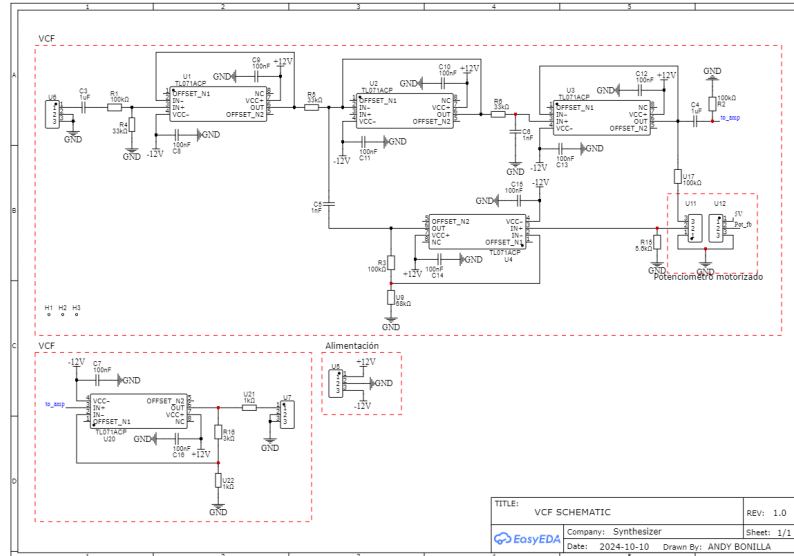


Figura 78: Topología filtro controlado por voltaje

13.2.2. Etapa de acondicionamiento de señal para PID

De forma similar, se procedió a realizar nuevamente la topología del circuito de acondicionamiento con los componentes reales, nótese en Figura 79.

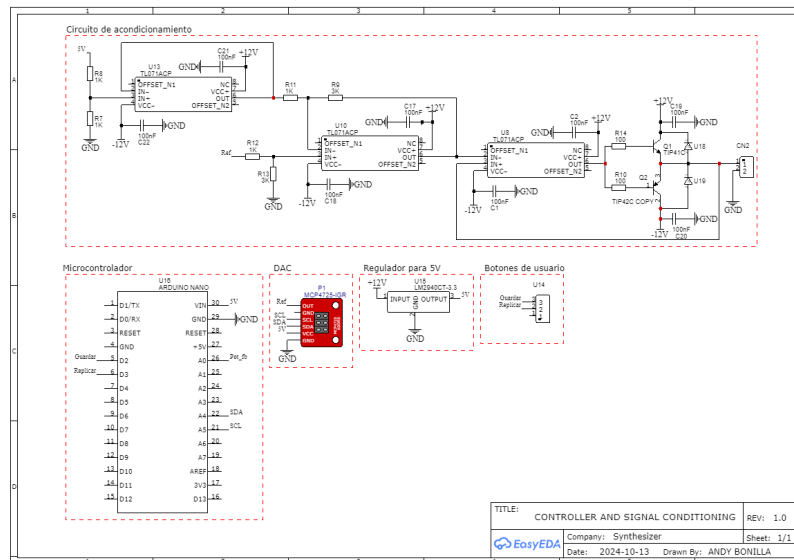


Figura 79: Topología en etapa de acondicionamiento

13.3. Diseño y fabricación de PCB

Seguidamente, a partir de los esquemáticos planteados en las Figura 78 y 79, se procedió a diseñar y rutear la placa de circuito impreso (PCB), donde en la Figura 44 se muestra el *layout* en 2D del sistema.

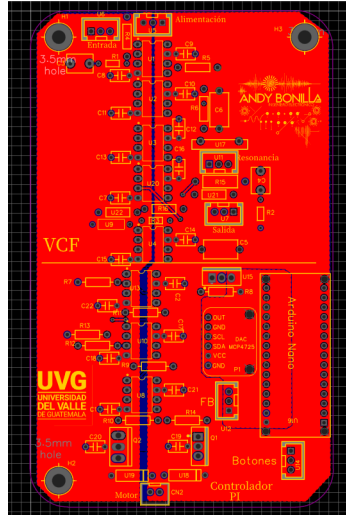


Figura 80: Vista 2D de PCB filtro controlado por voltaje

Por otro lado, en la Figura 81 se muestra la vista 3D del PCB con los respectivos componentes:

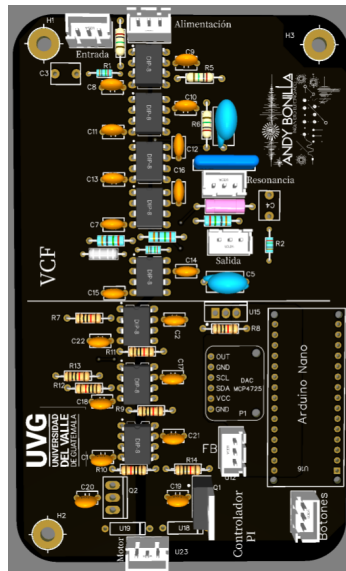


Figura 81: Vista 3D de PCB filtro controlado por voltaje

13.4. Resultados

Tras culminar las etapas de simulación en LTspice para validar el correcto funcionamiento del módulo de memoria de configuraciones, se procedió al proceso de fabricación y soldadura de las placas por medio de JLCPCB, obteniendo una placa fabricada y ensamblada, como se muestra en la Figura 82.

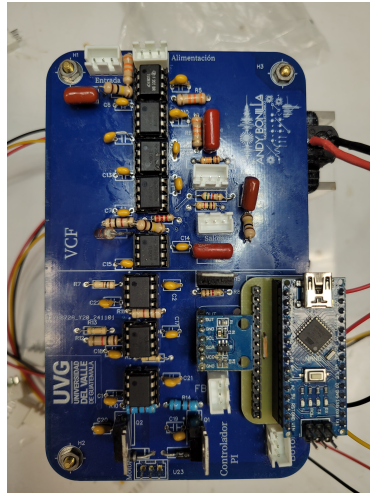


Figura 82: PCB físico ensamblado de memoria de configuraciones

A continuación, se presentan los productos de los dos subcircuitos clave para el módulo de memoria de configuraciones.

13.4.1. Filtro controlado por voltaje (VCF)

Se procedió a someter a pruebas reales, donde en primer lugar, se le inyectó un V_{In} con una señal cuadrada a 10 Hz , donde se superpone con su salida para poder verificar la resonancia que genera la topología, nótese en Figura 83.

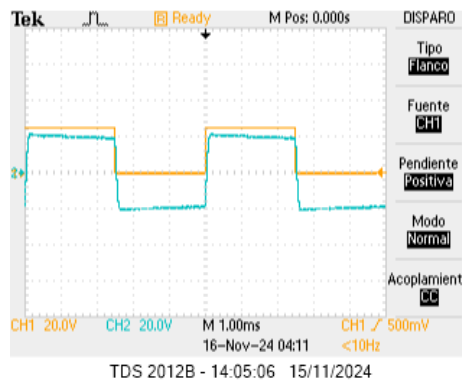


Figura 83: Medición en osciloscopio de entrada y salida de etapa de filtro controlado por voltaje (VCF)

13.4.2. Funcionamiento de PID

Primeramente, para poder tener una señal de control que pueda ser inyectada a la etapa de acondicionamiento, se desarrolló el código que contiene el controlador PI digital, el cual se encarga de guardar, recuperar y procesar la posición del potenciómetro de resonancia del sistema, nótese en listing 1.

```
1  /*-----  
2  ACTUALIZACION DE SINTETIZADOR ANALOGICO MODULAR Y DISENO DE MODULO PARA  
3  memoria de configuraciones DE USUARIO  
4  -----  
5  INGENIERIA ELECTRONICA  
6  -----  
7  Programa que se encarga de ejecutar el sistema de memoria de  
8  configuraciones del usuario, a través de un PID digital  
9  -----  
10 Andy Bonilla (19451)  
11 -----*/  
12  
13 /*-----  
14 ----- IMPORTACION DE LIBRERIAS  
15 -----*/  
16 #include <Wire.h>  
17 #include <Adafruit_MCP4725.h>  
18 #include <EEPROM.h>  
19 Adafruit_MCP4725 dac;  
20 /*-----  
21 ----- DIRECTIVAS DE COMPILADOR  
22 -----*/  
23 #define DELTA 0.01          //equivalente a 100Hz0  
24 #define MAX_BITS_DAC 4095.0  
25 #define MAX_BITS_ADC 1023.0  
26 #define COTA_INFERIOR_CONTROL -5.0  
27 #define COTA_SUPERIOR_CONTROL 5.0  
28 #define COTA_INFERIOR_DAC 0  
29 #define COTA_SUPERIOR_DAC 4095  
30 #define PENDIENTE 0.5  
31 #define INTERCEPTO 2.5  
32 #define V_NOMINAL 5  
33 #define PIN_GUARDAR 2  
34 #define PIN_REPLICAR 3  
35 #define EEPROM_ADDRESS 0  
36 /*-----  
37 ----- DECLARACION DE VARIABLES  
38 -----*/  
39 // Variables del PID  
40 float y_k = 0.0;  
41 float r_k = 2.5;  
42 float e_k = 0.0;  
43 float e_k_1 = 0.0;  
44 float eD = 0.0;  
45 float Ek = 0.0;  
46 float E_k_1 = 0.0;  
47 float u_k = 0.0;  
48 float dacOutput = 0.0;  
49 // Constantes del PID  
50 float kP = 3.0;  
51 float kI = 0.0;
```

```

52 float kD = 0.0;
53 // Variables de tiempo
54 unsigned long lastTime = 0;
55 float delta_t = 0.0;
56 //antirrebotes para botones
57 byte antirrebote1, antirrebote2; //antirrebotes
58 //variable para modo
59 int modo = 0;
60 /*-----
61 ----- INTERRUPTIONES POR BOTONAZOS
62 -----*/
63 //boton de guardar
64 void ISR_n1(){
65     antirrebote1=1;
66 }
67 //boton de replicar
68 void ISR_n2(){
69     antirrebote2=1;
70 }
71 /*-----
72 ----- SET UP
73 -----*/
74 void setup() {
75     dac.begin(0x60);
76     lastTime = millis();
77     pinMode(PIN_GUARDAR, INPUT_PULLUP);
78     pinMode(PIN_REPLICAR, INPUT_PULLUP);
79     attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(PIN_GUARDAR), ISR_n1, FALLING);
80     attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(PIN_REPLICAR), ISR_n2, FALLING);
81 }
82
83 /*-----
84 ----- FUNCION AUXILIAR DE MAPEO DE SALIDA
85 -----*/
86 // Ecuacion de la recta:  $y = 0.5 * x + 2.5$  -> mapeo de [-5,5] a [0,4095]
87 float mapVoltageToDAC(float voltage)
88 {
89     float dacValue = PENDIENTE * voltage + INTERCEPTO;
90     return (dacValue * MAX_BITS_DAC) / V_NOMINAL;
91 }
92 /*-----
93 ----- FUNCION AUXILIAR PARA GESTIONAR BOTONAZOS
94 -----*/
95 void gestion_botones(void){
96     // Antirrebote para guardar configuracion
97     if (digitalRead(PIN_GUARDAR) == 0 && antirrebote1 == 1){
98         int pote = analogRead(A0);
99         float voltaje_pote = (pote / MAX_BITS_ADC) * V_NOMINAL;
100         //guardar referencia en eeprom
101         EEPROM.put(0, voltaje_pote);
102         antirrebote1 = 0;
103     }
104     // Antirrebote para replicar configuracion
105     if (digitalRead(PIN_REPLICAR) == 0 && antirrebote2 == 1){
106         float storedVoltage;
107         EEPROM.get(0, storedVoltage);
108         //asignacion de nueva referencia
109         r_k = storedVoltage;
110         modo = 2;

```

```

111     antirrebote2 = 0;
112 }
113 }
114 /*-----
115 ----- FUNCION AUXILIAR PARA EJECUCION DE PID
116 -----*/
117 void ejecucion_pid(void)
118 {
119     //pseudo muestreo
120     unsigned long currentTime = millis();
121     delta_t = (currentTime - lastTime) / 1000.0; // Convertir a segundos
122     if (delta_t >= DELTA)
123     {
124         lastTime = currentTime;
125         // Lectura del potenciómetro (salida medida)
126         y_k = (analogRead(A0) * V_NOMINAL) / MAX_BITS_ADC;
127         // Calculo del error
128         e_k = r_k - y_k;
129         // Derivada del error
130         eD = (e_k - e_k_1) / delta_t;
131         // Integral del error
132         Ek = (E_k_1 + e_k) * delta_t;
133         // Ecuacion de diferencias del controlador PID
134         u_k = kP * e_k + (kI * Ek) + (kD * eD);
135         // Limitar la salida [-5V, 5V]
136         if (u_k > COTA_SUPERIOR_CONTROL) {
137             u_k = COTA_SUPERIOR_CONTROL;
138         } else if (u_k < COTA_INFERIOR_CONTROL) {
139             u_k = COTA_INFERIOR_CONTROL;
140         }
141         // Actualizacion de derivativo e integral anterior
142         e_k_1 = e_k;
143         E_k_1 = Ek;
144         // Convertir la salida de [-5V, 5V] a [0V, 5V] para el DAC
145         dacOutput = mapVoltageToDAC(u_k);
146         // Enviar hacia DAC
147         dac.setVoltage((int)dacOutput, false);
148         // Verificar si el error esta dentro del rango permitido
149         if (e_k >= -0.05 && e_k <= 0.05) {
150             //Serial.println("Error dentro del rango, PID desactivado.");
151             modo = 0; // Detener el PID si el error es muy pequeno
152         }
153     }
154 }
155 /*-----
156 ----- LOOP PRINCIPAL
157 -----*/
158 void loop() {
159     gestion_botones();
160     // Ejecutar PID solo cuando se presione el boton de replicar
161     if (modo == 2) {
162         ejecucion_pid();
163     }
164 }
165

```

Listing 1: Código con controlador PI digital

Al obtener el resultado de la ecuación de diferencias del controlador en un valor continuo de $[0\text{ V}, 5\text{ V}]$ gracias a un convertidor digital a analógico (DAC), esta ingresa a la etapa de acondicionamiento, por lo tanto, en la Figura 84 se superponen tanto un ejemplo de la señal de control, así como su escala en un rango de $\pm 5\text{ V}$.

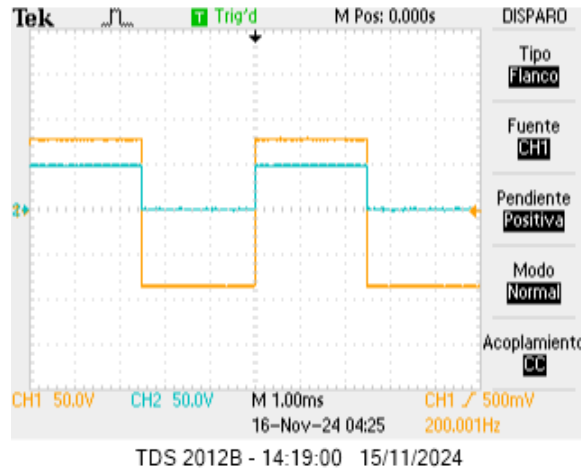


Figura 84: Medición en osciloscopio de acondicionamiento de señal de control

13.5. Discusión de resultados

Luego de las múltiples iteraciones en la manufactura del PCB para el módulo de memoria de configuraciones, se logró plantear tanto el esquema de la etapa de acondicionamiento de señal y la integración del controlador, como el programa base para implementar dicho controlador. Después de múltiples iteraciones con la manufactura de un PCB para el módulo de memoria de configuraciones, se notó que el *footprint* del microcontrolador poseía errores en la distribución, esto por tomar librerías públicas desarrolladas por usuarios y que son de libre acceso en EasyEDA, por lo que fue necesario el desarrollo de una placa auxiliar para interconectar de forma adecuada los pines del microcontrolador con los demás dispositivos. Pese al correcto funcionamiento del módulo, se sugiere separar la memoria de configuraciones en etapas independientes: un PCB dedicado exclusivamente al módulo de memoria dentro del sintetizador y otro PCB que contenga la topología del controlador junto con sus actuadores correspondientes. Esta configuración permitiría conectar ambos submódulos mediante potenciómetros de doble ganancia o conjuntos de cables, optimizando así la interacción eléctrica y facilitando futuras modificaciones o ajustes.

14.1. Abstracción de diseño

Para la fabricación de este nuevo elemento del sintetizador modular en formato Eurorack, donde tras realizar un análisis de múltiples diseños disponibles en el sitio [Thingiverse](#), se seleccionó aquel diseño con la mejor compatibilidad y escalabilidad; donde se basó en un modelo STL de código abierto desarrollado por Joe Beuckman [\[46\]](#), dado a su simplicidad y estructura modular ya que facilitaron la adaptación necesaria.

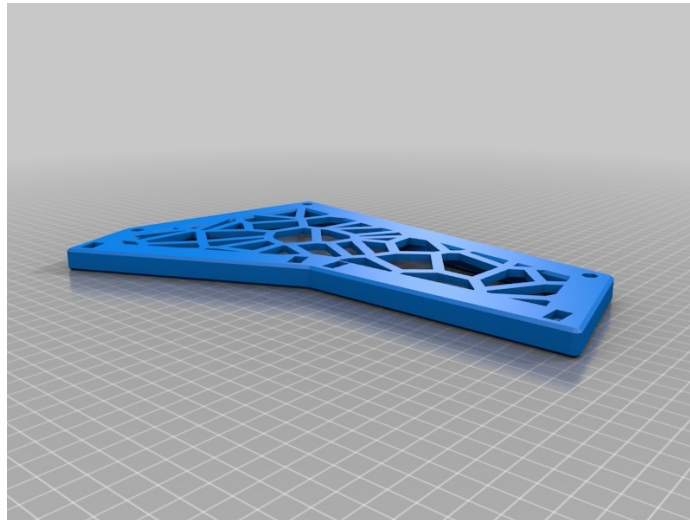


Figura 85: Diseño de carcasa Eurorack [\[46\]](#)

Tomando como punto de origen el diseño mencionado, se procedió a la impresión 3D de estos componentes por medio de las solicitudes del [Makerlab](#) del Departamento de Ingeniería Electrónica, Mecatrónica y Biomédica. Se obtuvieron los resultados que se muestran en la [Figura 86](#)

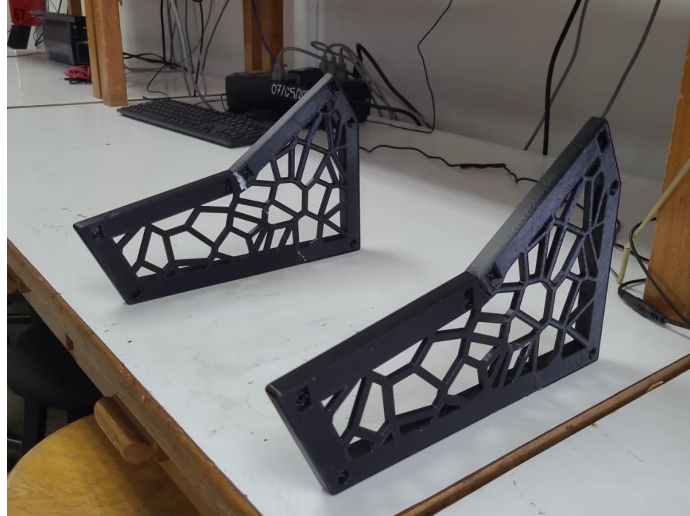


Figura 86: Impresión final de marco de carcasa

14.2. Mejoras al diseño

Ya que el diseño original planteaba el uso de carriles en impresión 3D para el montaje de los diferentes módulos del sintetizador, se procedió al uso de perfiles de aluminio 2020 Slot T1 (nótese la [Figura 87](#)), para poder tener mayor estabilidad, rigidez y escalabilidad para futuras expansiones.

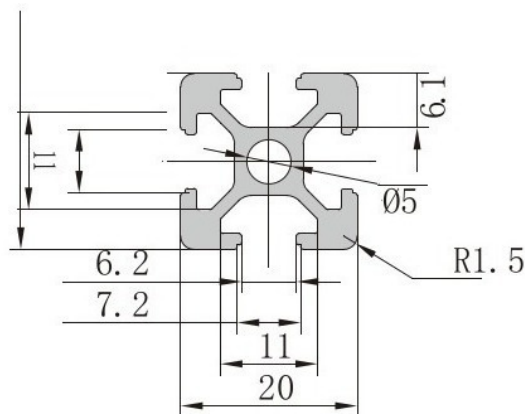


Figura 87: Perfil de aluminio implementado [46](#)

Considerando esta modificación mostrada en la Figura 87, así como el diseño impreso en 3D de la Figura 86, se obtuvo de forma preliminar la estructura mostrada en la Figura 88

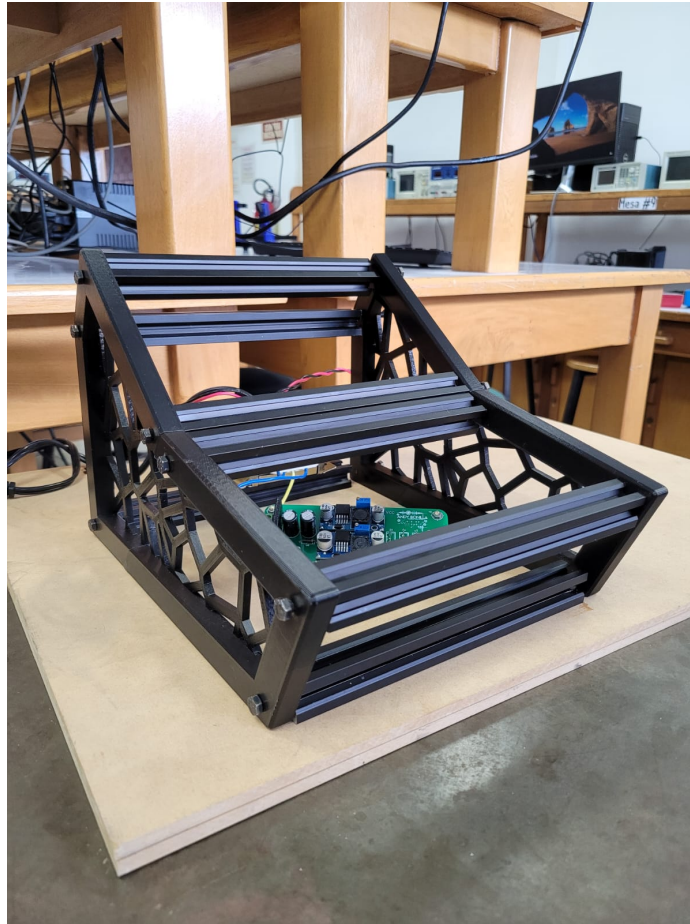


Figura 88: Captura de panel frontal Salida para corte láser

14.3. Diseño de paneles frontales

El diseño de los paneles frontales de un sintetizador modular es un paso muy importante, ya que no solo afecta la estética del instrumento, sino que también la funcionalidad y la interacción con el usuario. Los paneles frontales deben estar cuidadosamente diseñados para integrar los controles, conectores e indicadores de manera eficiente, asegurando una interacción fluida y eficiente entre todos los módulos del sistema.

A continuación, se presenta el proceso de diseño y construcción de cada uno de los módulos implementados, donde al considerar el estándar de altura planteado por la arquitectura Eurorack [16], se diseñaron los paneles que se muestran a continuación.

14.3.1. Módulo oscilador controlado por voltaje (VCO)

Considerando los componentes de entrada y salida, así como los potenciómetros para variar los parámetros del módulo, se procedió a diseñar en EasyEDA el prototipo del panel, nótese en Figura 89

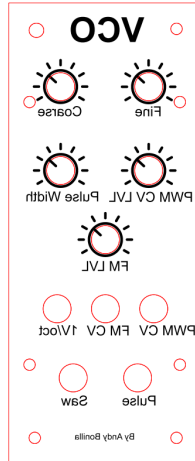


Figura 89: Captura de panel frontal VCO para corte láser

14.3.2. Módulo amplificador controlado por voltaje (VCA)

Considerando los componentes de entrada y salida, así como los potenciómetros para variar los parámetros del módulo, se procedió a diseñar en EasyEDA el prototipo del panel, nótese en Figura 89

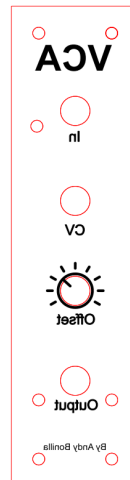


Figura 90: Captura de panel frontal VCA para corte láser

14.3.3. Módulo generador envolvente (EG)

Considerando los componentes de entrada y salida, así como los potenciómetros para variar los parámetros del módulo, se procedió a diseñar en EasyEDA el prototipo del panel, nótese en Figura 91

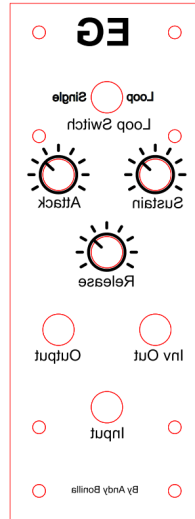


Figura 91: Captura de panel frontal EG para corte láser

14.3.4. Módulo de salida

Considerando los componentes de entrada y salida, así como los potenciómetros para variar los parámetros del módulo, se procedió a diseñar en EasyEDA el prototipo del panel, nótese en Figura 92

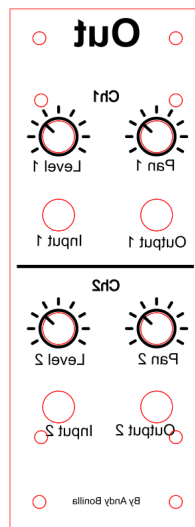


Figura 92: Captura de panel frontal salida para corte láser

14.3.5. Módulo memoria de configuraciones

Considerando los componentes de entrada y salida, así como los potenciómetros para variar los parámetros del módulo, se procedió a diseñar en EasyEDA el prototipo del panel, nótese en Figura [92](#)

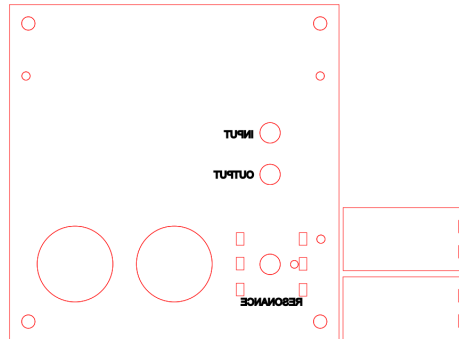


Figura 93: Captura de panel frontal VCF para corte láser

14.4. Producto final

El producto final consistió en una carcasa modular y resistente, adecuada para albergar los componentes del sintetizador Eurorack. La estructura resultante logró un equilibrio entre funcionalidad y diseño, ofreciendo una plataforma sólida para el montaje de los módulos electrónicos y mejorando la portabilidad del sistema. Las pruebas realizadas confirmaron que la carcasa cumplía con las especificaciones de diseño y superaba las expectativas en términos de durabilidad y facilidad de montaje, nótese en Figura [94](#)

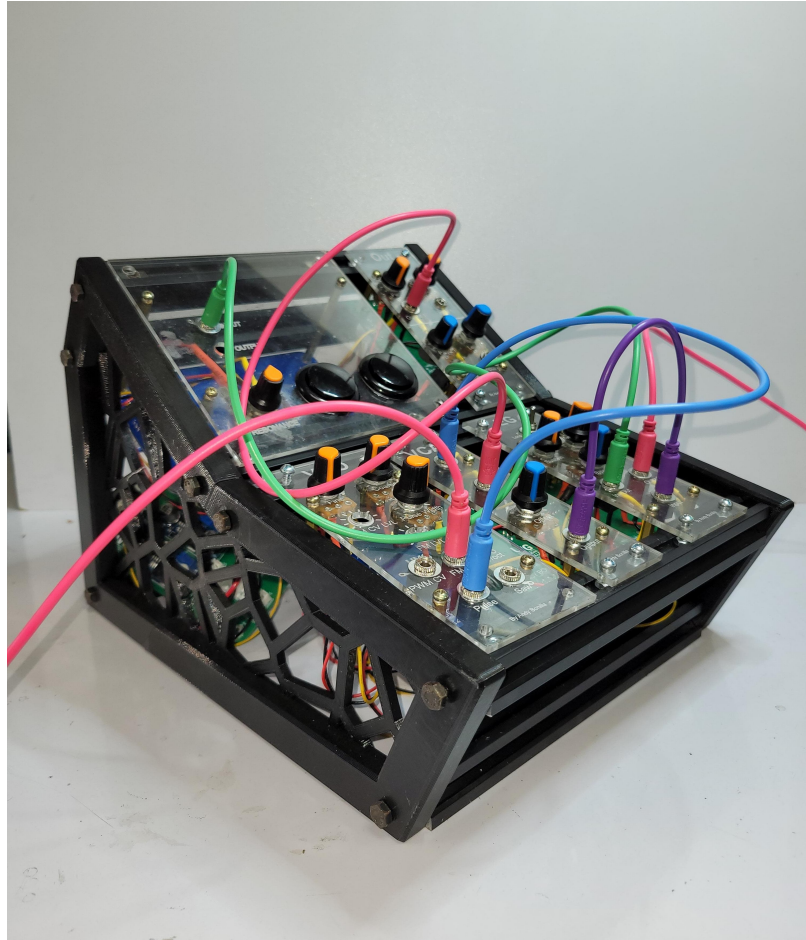


Figura 94: Carcasa final implementada

De acuerdo con los resultados obtenidos en los Capítulos 8 al 14, se pueden listar las conclusiones obtenidas.

- Se desarrolló de forma satisfactoria la incorporación de etapas de supresión de ruido eléctrico, mediante el uso de convertidores DC-DC, obteniendo una alimentación más eficiente y limpia de ruido eléctrico en rangos audibles.
- Se crearon y fabricaron las placas de circuito impreso (PCB) de acuerdo con las especificaciones de cada uno de los módulos del sintetizador existente, resultando en placas funcionales, mejorando la integración y facilitando el ensamblaje de los componentes.
- Se desarrolló e implementó una plataforma de hardware y software que permite al usuario guardar y recuperar la posición angular de un potenciómetro, permitiendo un alto nivel de personalización, facilitando la experiencia de uso y aportando flexibilidad al sintetizador modular.
- Se elaboró de forma satisfactoria una nueva carcasa para el sintetizador modular, cumpliendo con los requisitos estéticos y funcionales del proyecto. La estructura final proporciona un soporte estable para los módulos y mejora la estética, contribuyendo a una experiencia de uso más cómoda y profesional.

De acuerdo con los resultados obtenidos en los capítulos 8 al 14, se pueden listar las siguientes recomendaciones.

- Enriquecer al sintetizador por medio de una continua adición de módulos, como secuenciadores, máquinas de ritmos, efectos, entre otros; con el fin de continuar con los conocimientos contemporáneos para la síntesis de audio.
- Para aquellos circuitos que busquen la memoria de configuraciones para el usuario, sean implementados de forma digital, minimizando las posibles fuentes de error y reprocesos que pueden causar los circuitos analógicos.
- Una implementación más dinámica para el manejo de memoria al almacenar configuraciones, para así mejorar la experiencia del usuario a través del guardado de múltiples configuraciones y no solamente una.
- Que el marco de la carcasa se fabrique en un solo bloque, para poder obtener más rigidez en el sintetizador, ya sea utilizando impresores 3D de mayores dimensiones o bien la implementación de marcos de madera o aluminio.
- Se sugiere el diseño de etapas independientes para la realización de la memoria de configuraciones, es decir, un PCB cuya única función sea el módulo agregado al sintetizador, y otro PCB cuyo objetivo sea contener la topología del controlador y su respectivo actuador y/o actuadores, conectando ambos submódulos con potenciómetros con doble ganancia o juegos de cables para una correcta interacción eléctrica.
- Se aconseja una profunda revisión de todos los *footprints* que se desean utilizar dentro de las placas de circuito impreso, ya que el notar estos errores retrasa los avances de los proyectos, puede crear reprocesos y aumento en el presupuesto.

-
-
- [1] T. Connaghan, *Síntesis modular*, M. Blog, ed. dirección: <https://emastered.com/es/blog/modular-synthesis>.
 - [2] Aed, “Altium Designer,” en <https://www.altium.com/es/altium-designer/>, asdfa, 2024, dsfg.
 - [3] S. Salguero, “Construcción de un sintetizador analógico modular y diseño e implementación de software para efectos, grabación y reproducción de audio,” en *Trabajo de graduación en modalidad de Tesis Para optar al grado académico de Licenciada en Ingeniería en Tecnología de Audio*, Universidad del Valle de Guatemala, 2024, págs. 3-92.
 - [4] H. de León, “Análisis e implementación de un sintetizador de audio mediante circuitos analógicos y algoritmos digitales controlados por comunicación MIDI,” en *Trabajo de graduación en modalidad de Tesis Para optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería en Tecnología de Audio*, Universidad del Valle de Guatemala, 2024, págs. 3-66.
 - [5] J. Guarcax, “Emulación digital no lineal del sintetizador minimoog,” en *Trabajo de graduación en modalidad de Tesis Para optar al grado académico de Licenciada en Ingeniería Mecatrónica*, Universidad del Valle de Guatemala, 2020, págs. 3-106.
 - [6] M. Valenzuela, “Desarrollo e implementación de un sintetizador digital de audio empleando metodologías auditivas y sustractivas,” en *Trabajo de graduación en modalidad de Tesis Para optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería Mecatrónica*, Universidad del Valle de Guatemala, 2019, págs. 3-94.
 - [7] D. Morales, “Emulación digital de efectos de audio analógicos mediante análisis de sistemas dinámicos no lineal,” en *Trabajo de graduación en modalidad de Tesis Para optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería Mecatrónica*, Universidad del Valle de Guatemala, 2019, págs. 3-153.
 - [8] R. A. Moog, “Voltage-Controlled Electronic Music Modules,” *Audio Engineering Society*, n.º 346, 1964.
 - [9] M. Jenkins, “Analog Synthesizers,” Taylor Francis, 2020.

- [10] Txirula, *Historia del sintetizador*, Txirula, ed. dirección: <https://www.txirula.com/blog/historia-sintetizador.html>.
- [11] J. Pareles, *Don Buchla, Inventor, Composer and Electronic Music Maverick, Dies at 79*, T. N. Y. Times, ed. dirección: <https://www.nytimes.com/2016/09/18/arts/music/don-buchla-dead.html>.
- [12] R. Wilson, "Make Analog Synthesizers," Maker Media, 2013.
- [13] T. M. Telegraph, *Why do we pay attention to analog synthesizers?* T. M. Telegraph, ed. dirección: <https://www.themusictelegraph.com/249>.
- [14] P. Elsea, *Digital synthesizers*, S. C. University of California, ed. dirección: <http://artsites.ucsc.edu/EMS/music/equipment/synthesizers/digital/Digisynths.html>.
- [15] D. Fisher, *Analog vs. Digital Synthesizers*, Sweetwater, ed. dirección: <https://www.sweetwater.com/insync/analog-vs-digital-synthesizers/>.
- [16] R. News, *Beginner's Guide to Eurorack: Case Basics, Power and Your First Modules*. dirección: <https://reverb.com/news/beginners-guide-to-eurorack-case-basics-power-and-your-first-modules>.
- [17] R. Meurer, *EuroRack dimensions*. dirección: https://midisoft.de/EuroRackDimensions/EuroRack_Dimensions.html.
- [18] E. Hub, *Voltage Controlled Oscillators (VCO)*, E. Hub, ed. dirección: <https://www.electronicshub.org/voltage-controlled-oscillators-vco/>.
- [19] E. Tagi, *Learning Synthesis: Oscillators. The voice of the machine*, P. Circuit, ed. dirección: <https://www.perfectcircuit.com/signal/learning-synthesis-oscillators>.
- [20] Faxter, *Formas de ondas periódicas*, Faxter, ed. dirección: <https://www.faxter.es/Biblioteca/L013Formasdeonda/tabid/131/Default.aspx>.
- [21] M. K. Erica Synths, *User manual EDU DIY VCA*, E. Tutorial, ed. dirección: https://www.ericasynts.lv/media/VCA_MANUAL_FINAL.pdf.
- [22] S. Rise, *Voltage-Controlled Amplifier (VCA)*, T. S. Academy, ed. dirección: <https://synthesizeracademy.com/voltage-controlled-amplifier-vca/>.
- [23] Envelope, *WHAT IS A POWER SUPPLY, AND HOW DOES IT WORK?* Pittsburghmodular, ed. dirección: <https://pittsburghmodular.com/envelope>.
- [24] Apple, *Ataque, caída, sostenimiento y liberación*, Apple, ed. dirección: <https://support.apple.com/es-lamr/guide/mainstage/lgsife419620/mac>.
- [25] D. Carrasco, *Schmitt Trigger: Qué es y para qué sirve*, ElectroSoftCloud, ed. dirección: <https://www.electrosoftcloud.com/schmitt-trigger-que-es/>.
- [26] B. Razavi, "Fundamentals of Microelectronics," University of California, Los Angeles, 2016.
- [27] E. Tutorial, *Class AB Amplifier*, E. Tutorial, ed. dirección: <https://www.electronicstutorials.ws/amplifier/class-ab-amplifier.html>.
- [28] A. Oppenheim, "Discrete-Time Signal Processing," en *Discrete-Time Signal Processing*, Pearson Education, 2010.

- [29] G. Lambert, *HOW ANALOG TO DIGITAL CONVERTERS WORK*, E. Tutorials, ed. dirección: <https://www.circuitbasics.com/analog-to-digital-converters/>.
- [30] P. Prandoni, *Signal Processing for Communications*. L. E. Press, ed. dirección: <https://www.sp4comm.org/docs/sp4comm.pdf>.
- [31] Globalspec, *Digital-to-Analog Converters Information*, Electronics360, ed. dirección: https://www.globalspec.com/learnmore/data_acquisition_signal_conditioning/signal_converting/digital_to_analog_converters.
- [32] N. Nise, "Control Systems Engineering," en *Control Systems Engineering*, California State Polytechnic University, Pomona, 2011.
- [33] Ledin, *Control System Basics*, L. E. Inc, ed. dirección: <https://ledin.com/control-systems-basics/>.
- [34] Dewesoft, *PID Control*, LDewesoft, ed. dirección: <https://training.dewesoft.com/online/course/pid-control>.
- [35] L. Rivera, *PID Control digital*, U. del Valle de Guatemala, ed. dirección: https://uvg.instructure.com/courses/32274/files/6568812?module_item_id=763637.
- [36] A. C. Technology, *WHAT IS A POWER SUPPLY, AND HOW DOES IT WORK?* Dirección: <https://www.actpower.com/educational/what-is-a-power-supply-and-how-does-it-work/>.
- [37] E. C. de Ardu, *Fuentes de Alimentación*, E. C. de Ardu, ed. dirección: <https://www.elcajondeardu.com/fuentes-de-alimentacion/>.
- [38] MPS, *Buck Converters (Step-Down Converter)*, M. Scholar, ed. dirección: <https://www.monolithicpower.com/en/learning/mpscholar/power-electronics/dc-dc-converters/buck-converters>.
- [39] T. Instruments, *Input and Output Capacitor Considerations in a Synchronous Buck Converter*, T. Instruments, ed. dirección: <https://www.ti.com/document-viewer/lit/html/SSZTAL7?search=buck#GUID-3EDE487C-5BCB-45E3-8940-52FAA90331EA/GUID-25EBDC52-E0AA-433E-A906-47BCABD0A888>.
- [40] G. Di Maria, *Power Electronics Course: Part 6 — Step-Down DC/DC Converter*, P. E. News, ed. dirección: <https://www.powerselectronicsnews.com/power-electronics-course-part-6-dc-dc-converter-step-down/>.
- [41] J. JLCPCB, *JLCPCB*. dirección: <https://jlcpcb.com>.
- [42] M. K. Erica Synths, *User manual EDU DIY VCO*, E. Tutorial, ed. dirección: https://www.ericasynths.lv/media/VCO_MANUAL_v2.pdf.
- [43] M. K. Erica Synths, *User manual EDU DIY Envelope Generator*, E. Tutorial, ed. dirección: https://www.ericasynths.lv/media/EG_MANUAL_v3.pdf.
- [44] M. K. Erica Synths, *User manual EDU DIY Output Mixer*, E. Tutorial, ed. dirección: https://www.ericasynths.lv/media/DIY_EDU_Output_Manual.pdf.
- [45] M. K. Erica Synths, *User manual EDU DIY VCF*. dirección: https://www.ericasynths.lv/media/VCF_MANUAL_v2.pdf.
- [46] J. Beuckman, *Eurorack Two-Row*. dirección: <https://www.thingiverse.com/thing:2731758>.

18.1. Fuente de alimentación

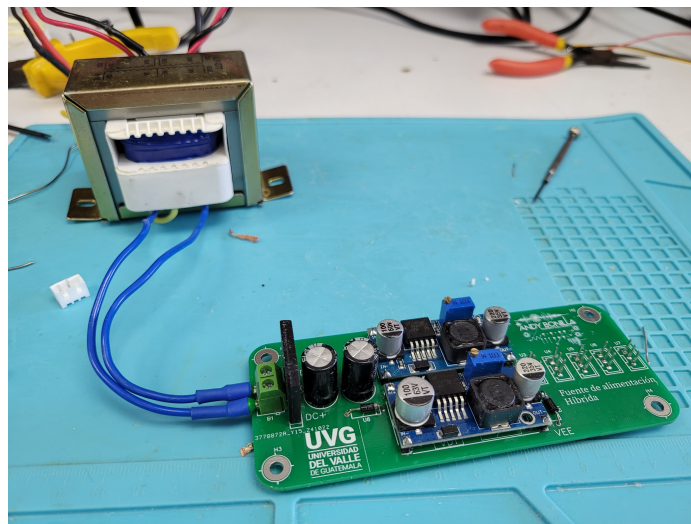


Figura 95: Fuente de alimentación

18.2. Módulo oscilador controlado por voltaje

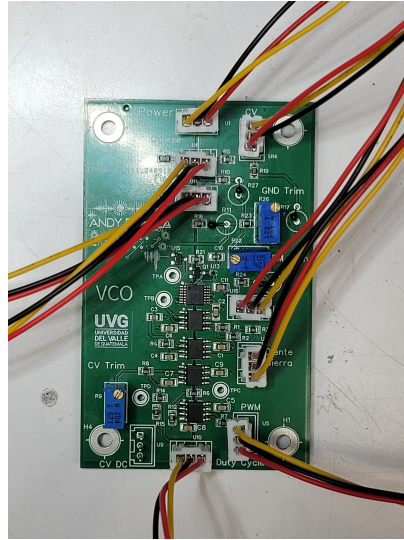


Figura 96: Módulo oscilador controlado por voltaje

18.3. Módulo amplificador controlado por voltaje

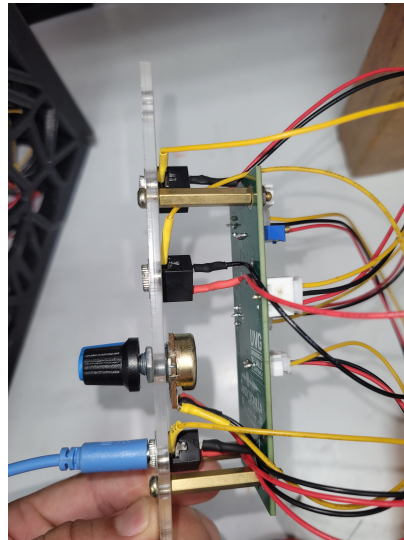


Figura 97: Vista varia módulo VCA

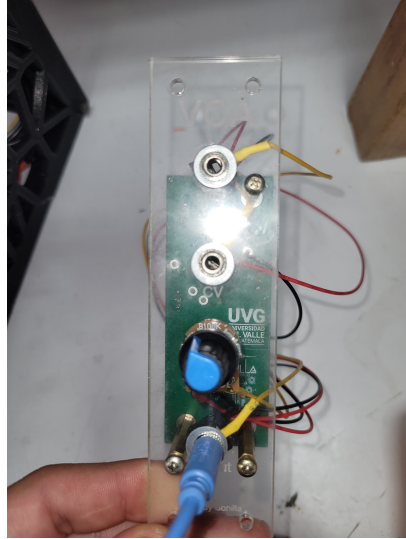


Figura 98: Vista varia módulo VCA

18.4. Módulo generador envolvente

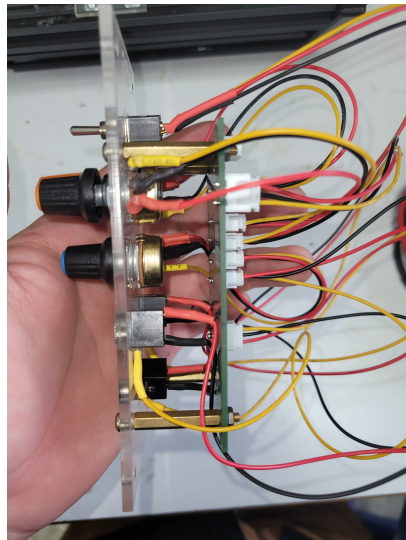


Figura 99: Vista varia módulo EG

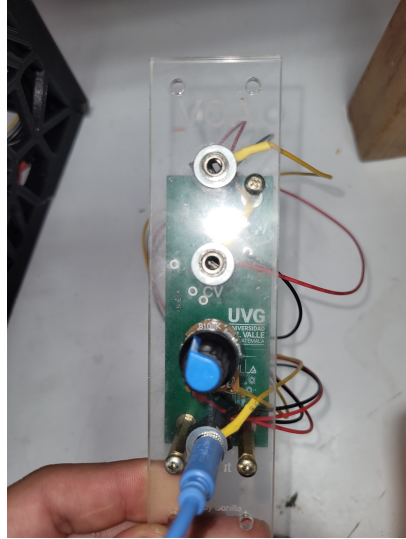


Figura 100: Vista varia módulo EG

18.5. Módulo de salida

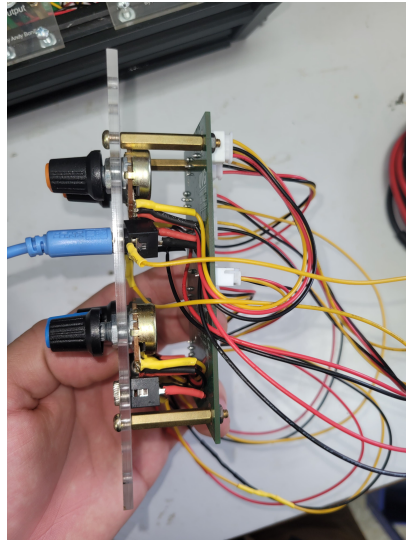


Figura 101: Vista varia módulo salida

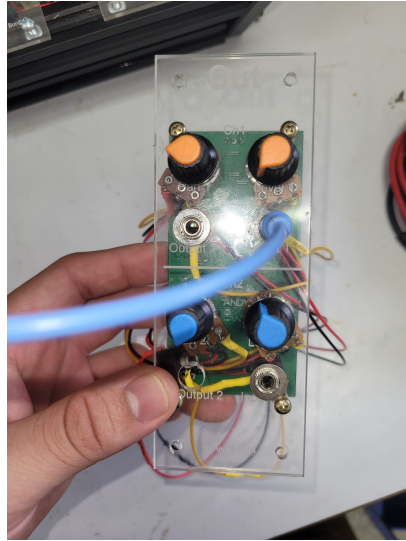


Figura 102: Vista varia módulo Salida

18.6. Módulo de memoria de configuraciones



Figura 103: Vista varia módulo memoria de configuraciones

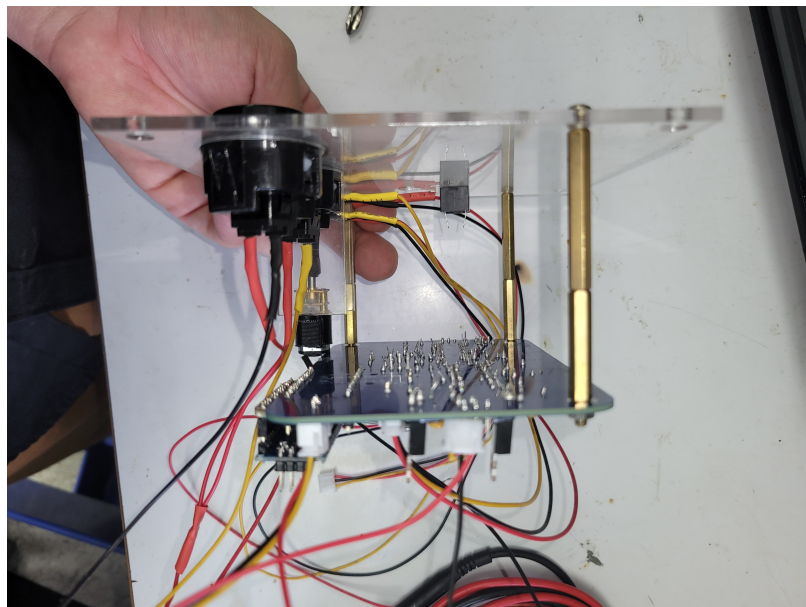


Figura 104: Vista varia módulo memoria de configuraciones

Convertidores tipo Buck Módulos cuyo objetivo es reducir de forma eficiente un voltaje de entrada alto hacia un voltaje de salida más bajo. [vi](#), [31](#)

Eurorack Formato es un estándar en la fabricación de sintetizadores modulares. [vi](#), [16](#), [77](#)

Fuentes de alimentación Módulo responsable de suministrar la suficiente energía eléctrica a circuitos o dispositivos electrónicos. [vi](#), [31](#)

Generador envolvente Módulo en el que recae la modulación de amplitud, frecuencia y/o timbre de la señal eléctrica que se desea modular. [vi](#), [18](#)

LTI Aquellos sistemas cuyos principios de superposición y homogeneidad se cumplen, y cuyas características no cambian con el tiempo, permitiendo un análisis simplificado mediante herramientas como la transformada de Laplace o de Fourier. [23](#), [66](#)



PID Ajusta la salida de un sistema con base en el error actual, acumulado y anticipado, combinando control proporcional, integral y derivativo para lograr estabilidad y precisión. [vi](#), [27](#), [66](#)



Schmitt Trigger Integrado capaz convertir una señal de entrada analógica en una señal discreta mediante la histéresis interna del sistema.. [vi](#), [19](#)

Sintetizador Instrumento musical que a partir de circuitos eléctricos puede convertir señales eléctrica en señales acústicas. [14](#)

sintetizadores digitales Emplean microcontroladores para poder generar y manipular sonido utilizando valores discretos, esto por medio de la modulación de señales digitales a continuas por medio de convertidores DAC. [15](#)

Sistema de control Sistemas cuyo objetivo es garantizar la estabilidad, rendimiento y eficiencia de sistemas complejos. [vi](#), [25](#), [66](#)

VCA Módulo responsable de modular de forma dinámica la amplitud de las señales de audio en función de los voltajes de control (CV).   17

VCO Módulo que genera formas de onda cuya frecuencia está determinada por un voltaje controlado que le inyecte por el usuario (CV).   17