
Diseño e Implementación de una Máquina de Ritmos con Interfaz Analógica Controlada Mediante Programación de Código Abierto con Fines Educativos

André Fuentes Noriega



UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA
Facultad de Ingeniería



**Diseño e Implementación de una Máquina de Ritmos
con Interfaz Analógica Controlada Mediante
Programación de Código Abierto con Fines
Educativos**

Trabajo de graduación en modalidad de tesis presentado por
André Fuentes Noriega
para optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería en
Tecnología de Audio

Guatemala,
2024

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA
Facultad de Ingeniería



**Diseño e Implementación de una Máquina de Ritmos
con Interfaz Analógica Controlada Mediante
Programación de Código Abierto con Fines
Educativos**


Trabajo de graduación en modalidad de tesis presentado por
André Fuentes Noriega
para optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería en
Tecnología de Audio

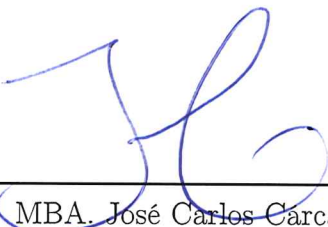
Guatemala,
2024

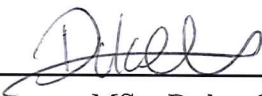
Vo.Bo.:

(f) 
MBA. Fredy David España Capilla

Tribunal Examinador:

(f) 
MBA. Fredy David España Capilla

(f) 
MBA. José Carlos Cárcamo

(f) 
MSc. Dulce Chacón

Fecha de aprobación: Guatemala, 24 de junio de 2024.

Agradecimientos

Quiero empezar dando las gracias de todo corazón a mis padres, quienes han sido mi soporte inquebrantable durante mi carrera universitaria. Su amor, paciencia y motivación han sido pilares fundamentales para cumplir mis objetivos académicos.

También quiero agradecer de manera especial a mi abuelita Mara, quien se ha dedicado a cuidar de mí y de mi bienestar con todo su amor y dedicación. Su constante preocupación y presencia han sido un oasis de paz en mi vida de estudiante.

Un agradecimiento especial a Fredy, mi asesor de tesis y amigo, cuya guía y sabiduría han sido clave en el desarrollo de este proyecto. Sus consejos e ideas valiosas han sido esenciales para llevar a cabo esta investigación.

Además, no puedo dejar de agradecer a mis amigos de la carrera de Ingeniería en Tecnología de Audio: Sofia, Hector, Jeremy y Jamiel. Hemos formado un equipo formidable; juntos hemos superado los retos de la carrera, aprendiendo y apoyándonos mutuamente en cada momento. Su amistad y colaboración han enriquecido mi experiencia universitaria de manera significativa.

Gracias a cada uno de ustedes por su invaluable apoyo, que ha sido fundamental para alcanzar este logro.

Agradecimientos	III
Lista de figuras	IX
Lista de cuadros	X
Resumen	XI
1. Introducción	1
2. Objetivos	2
2.1. Objetivo general	2
2.2. Objetivos específicos	2
3. Justificación	3
4. Marco teórico	4
4.1. Historia de las máquinas de ritmo	4
4.1.1. La primera máquina de ritmo	4
4.1.2. El Rythmicon	5
4.1.3. La Side Man de Wurlitzer	5
4.1.4. Serie TR de Roland	6
4.1.5. Roland TR-808	7
4.1.6. Roland TR-909	9
4.2. Audio digital	11
4.2.1. Propiedades de la forma de onda	11
4.2.2. Limitaciones del audio digital	12
4.2.3. Fundamentos de tiempo continuo y discreto	12
4.2.4. Muestreo y reconstrucción	12
4.2.5. Técnicas de buffering y almacenamiento en tiempo real	13
4.2.6. Análisis en los dominios de tiempo y frecuencia	14
4.3. Partes de las máquinas de ritmo modernas	15
4.4. Microcontroladores	17
4.4.1. Microcontroladores para aplicaciones de audio	17
4.4.2. Arduino IDE y su lenguaje de programación	19
4.4.3. Dispositivos externos	19
4.5. Placas de circuito: PCBs y placas perforadas	21

4.5.1.	PCBs (Printed Circuit Boards)	21
4.5.2.	Placas perforadas	21
4.6.	Modelado 3D	22
4.6.1.	OnShape	22
4.7.	Métodos de impresión 3D	22
4.7.1.	Tipos de filamento	23
4.8.	Metodología de enseñanza de música electrónica	23
4.8.1.	Bases de un enfoque efectivo	23
4.8.2.	Contexto global	24
4.8.3.	Música electrónica en la Universidad del Valle de Guatemala	26
5.	Alcance	28
6.	Desarrollo del proyecto	29
6.1.	Características y capacidades para el proyecto	29
6.2.	Selección de componentes	30
6.2.1.	Selección de microcontrolador	30
6.2.2.	Selección de componentes para la interfaz de usuario	31
6.3.	Programación	32
6.3.1.	Documentación y versionado	32
6.3.2.	Configuración del entorno de desarrollo	32
6.3.3.	Librerías	33
6.3.4.	Funciones	34
6.4.	Diseño del circuito electrónico	35
6.4.1.	Selección de pines del Teensy 4.1 y el Audio Board Rev D	35
6.4.2.	Creación del esquemático	38
6.4.3.	Diseño inicial en placa perforada	39
6.5.	Diseño de PCB	39
6.5.1.	Esquemático en EasyEDA	39
6.5.2.	Parámetros y reglas de diseño	41
6.5.3.	Tamaño de placa	41
6.5.4.	Enrutamiento y diseño final	41
6.5.5.	Simulación del PCB	42
6.5.6.	Fabricación del PCB	42
6.6.	Diseño e impresión 3D	42
6.6.1.	Diseño con OnShape	42
6.6.2.	Selección del material	43
6.6.3.	Proceso de impresión 3D con Prusa MINI+	43
6.7.	Ensamblaje	45
6.7.1.	Preparación de componentes	46
6.7.2.	Incorporación del PCB	46
6.7.3.	Montaje de la tapadera	46
6.7.4.	Instalación final	47
6.8.	OR-1: Open Source Educational Kit 2024	49
7.	Resultados	50
7.1.	Diseño y desarrollo del circuito electrónico	50
7.2.	Programación del software de la máquina	50
7.3.	Resultados con la máquina de ritmos	51
7.3.1.	Pruebas de volumen	51
7.3.2.	Análisis visual de formas de onda	51
7.3.3.	Análisis de valor RMS	52
7.3.4.	Prueba de filtro pasa altas	52
7.3.5.	Prueba de efecto granular	53

7.4. Evaluación de interés de la OR-1 como recurso educativo	54
7.5. Elaboración de la guía de construcción	55
8. Conclusiones	56
9. Recomendaciones	57
10. Bibliografía	58
Bibliografía	58
11. Anexos	62
A. Repositorio de GitHub para la OR-1	62
B. Encuesta	62
C. Guía de construcción	62

Lista de figuras

1.	Banda de Autómatas de al-Jazari [1]	4
2.	El Rhythmicon [25]	5
3.	La Side Man [17]	6
4.	Roland TR-909 y TR-808 [33]	6
5.	Diagrama de bloques de la TR-808 [42]	7
6.	Carga y descarga de un capacitor [18]	7
7.	Circuito para caja de la TR-808 [42]	8
8.	Circuito para Hi-Hats de la TR-808 [42]	8
9.	Diagrama de bloques de la TR-909 [43]	9
10.	Circuito para bombo de la TR-909 [43]	10
11.	Direcciones ROM para Hi-hats abiertos y cerrados en la TR-909 [43]	10
12.	Conversión de señal análoga a digital [23]	11
13.	Visualización gráfica de las propiedades de una onda senoidal [20]	11
14.	Representación de onda en tiempo continuo y discreto [5]	12
15.	Muestreo de una señal sinusoidal a una tasa baja y alta [36]	12
16.	Ejemplo de aliasing en una señal de audio digital [36]	13
17.	Profundidad de bits en muestreo [23]	13
18.	Ejemplo de Buffer Digital [5]	14
19.	Representación gráfica de la FFT aplicada a una señal de audio [5]	15
20.	Teensy 4.1 con Audio Board [39]	18
21.	Arduino Uno R3 [3]	18
22.	Raspberry Pi Pico [41]	19
23.	Módulo de Encoder Rotativo KY-040 [10]	20
24.	NeoTrellis de Adafruit [26]	20
25.	Pantalla OLED SSD1306 de Adafruit [46]	21
26.	Ejemplos de impresión 3D en FDM, SLA y SLS [29]	22
27.	Propiedades físicas de los filamentos PLA, ABS y PETG [44]	23
28.	Diseño preliminar de la máquina de ritmos: elaboración propia	30
29.	Pinout del Teensy Audio Board Rev D [37]	36
30.	Pinout del Teensy 4.1 [37]	36
31.	Esquemático completo del circuito de máquina de ritmos	38
32.	Placa perforada para el circuito electrónico	39
33.	Diseño final del PCB	40
34.	Esquemático para diseño de PCB	40
35.	Cálculadora de ancho de trazas ANSI[13]	41

36.	Simulación 3D del PCB	42
37.	PCB impreso para la máquina de ritmos	43
38.	Vista isométrica de la caja básica [28]	44
39.	Vista isométrica del diseño final de la caja 1	44
40.	Vista isométrica del diseño final de la caja 2	44
41.	Vista superior del diseño final de tapadera	45
42.	Vista inferior del diseño final de tapadera	45
43.	Prusa MINI+ en proceso de impresión de la tapadera para la caja	45
44.	Piezas de la máquina de ritmos impresas en 3D	46
45.	Teensy 4.1 y AudioBoard Rev D en configuración “stacked” con headers hembra	46
46.	PCB con headers	47
47.	Componentes de la interfaz de usuario con sus cables soldados	47
48.	Instalación de componentes en la tapadera	47
49.	Caja con PCB y roscas para tornillos	48
50.	Máquina de ritmos ensamblada	48
51.	Isologo de la OR-1	49
52.	Comparación visual de formas de onda con volumen 8, 5 y 1, respectivamente	51
53.	Análisis espectral de la secuencia limpia	52
54.	Análisis espectral de la secuencia con filtro pasa altas al 25 %	52
55.	Análisis espectral de la secuencia con filtro pasa altas al 50 %	52
56.	Análisis espectral de la secuencia con filtro pasa altas al 100 %	53
57.	Formas de onda para secuencia completamente limpia, intermedio y completamente mojada con el efecto granular	53
58.	Portada y contraportada de la guía de construcción de la OR-1	55
59.	Consentimiento informado de la encuesta	63
60.	Explicación del proyecto en la encuesta	64
61.	Resultados de la encuesta 1	65
62.	Resultados de la encuesta 2	66
63.	Página 3 de la guía de construcción	67
64.	Página 5 de la guía de construcción	67
65.	Página 6 de la guía de construcción	68
66.	Página 7 de la guía de construcción	68
67.	Página 8 de la guía de construcción	69
68.	Página 9 de la guía de construcción	69
69.	Página 10 de la guía de construcción	70
70.	Página 11 de la guía de construcción	70
71.	Página 12 de la guía de construcción	71
72.	Página 13 de la guía de construcción	71
73.	Página 14 de la guía de construcción	72
74.	Página 15 de la guía de construcción	72
75.	Página 16 de la guía de construcción	73
76.	Página 17 de la guía de construcción	73
77.	Página 18 de la guía de construcción	74
78.	Página 19 de la guía de construcción	74
79.	Página 20 de la guía de construcción	75
80.	Página 21 de la guía de construcción	75
81.	Página 22 de la guía de construcción	76
82.	Página 23 de la guía de construcción	76
83.	Página 24 de la guía de construcción	77
84.	Página 25 de la guía de construcción	77
85.	Página 26 de la guía de construcción	78
86.	Página 27 de la guía de construcción	78

87.	Página 28 de la guía de construcción	79
88.	Página 29 de la guía de construcción	79
89.	Página 30 de la guía de construcción	80
90.	Página 31 de la guía de construcción	80
91.	Página 32 de la guía de construcción	81
92.	Página 33 de la guía de construcción	81
93.	Página 35 de la guía de construcción	82

Lista de cuadros

1.	Tabla comparativa de microcontroladores	31
2.	Reglas de diseño para la fabricación del PCB [30]	41
3.	Valores RMS para análisis de control de volumen	52

Este trabajo presenta el desarrollo de OR-1 la cual es una máquina de ritmos autónoma diseñada con un microcontrolador Teensy 4.1 y su tarjeta de audio. La máquina incorpora una matriz de 16 pads de batería, controles para volumen, tempo y efectos, y botones para varios modos de operación enfocada en ser un recurso educativo fácilmente replicable. Se seleccionaron componentes accesibles y funcionales para garantizar su adaptabilidad y eficacia en entornos educativos. El diseño permite que OR-1 funcione independientemente sin requerir software externo para su control lo que facilita su uso y comprensión en contextos educativos.

El proyecto adopta un enfoque de código abierto, permitiendo a los usuarios y colaboradores modificar libremente el código fuente, así como los modelos 3D y PCB, según sus necesidades específicas. Adicionalmente, se elaboró una guía de construcción detallada que documenta el circuito electrónico, los diseños y el proceso de ensamblaje ofreciendo un recurso valioso para quienes deseen replicar o adaptar el diseño de la máquina de ritmos.

Finalmente, se realizaron pruebas que incluyen simulaciones y encuestas para validar el diseño y funcionalidad de la máquina, asegurando que la OR-1 cumple con los objetivos educativos y funcionales establecidos.

CAPÍTULO 1

Introducción

Con el objetivo de impulsar el avance tecnológico y la educación interdisciplinaria en la música se desarrolló la OR-1, una máquina de ritmos diseñada para uso educativo en la Universidad del Valle de Guatemala, específicamente para el curso de Música Electrónica. Para esto, se fusionan disciplinas como la ingeniería electrónica, la programación para audio y la mecánica.

Este proyecto aborda el desarrollo del software y hardware necesarios para la creación de este instrumento electrónico. El proceso del mismo se basa en la programación del software utilizando el microprocesador Teensy 4.1 y su AudioBoard Rev D. También se realiza el diseño del circuito electrónico y PCB y el chasis de la máquina. Además, se crea una guía como recurso didáctico que detalla el proceso de creación y se enfoca en el ensamblaje de la misma para su recreación y posible modificación. Esto se engloba como un recurso Open Source que busca fomentar el interés en el campo de la tecnología musical y su desarrollo.

Finalmente, se realizan encuestas dirigidas al grupo objetivo para determinar la viabilidad de un proyecto de este tipo en el contexto universitario actual, y el interés en la propuesta.

2.1. Objetivo general

Desarrollar una máquina de ritmos controlada analógicamente mediante programación digital de código abierto que pueda ser replicada y utilizada como recurso educativo.

2.2. Objetivos específicos

- Crear una máquina de ritmos de 4 compases con 16 pads de batería, salidas de audio, perillas para controlar volumen, tempo, filtros, efectos y una pantalla de visualización de configuraciones.
- Diseñar y desarrollar el circuito electrónico de la máquina de ritmos, integrando componentes análogos y digitales de manera eficiente y funcional.
- Programar un software de control utilizando código abierto asegurando la compatibilidad y accesibilidad para su replicación y modificación.
- Elaborar una guía de construcción de una máquina de ritmos que integre la teoría y la práctica de diversas áreas como la programación para audio, ingeniería electrónica y diseño mecánico enfocado en la música electrónica.

El desarrollo de este proyecto adopta un enfoque interdisciplinario que combina aspectos de la ingeniería electrónica, programación para audio e ingeniería mecánica con un enfoque en tecnología musical. Actualmente, la tecnología musical presenta una escasez de investigación en Guatemala y Centroamérica debido a su relativa novedad, surgiendo a finales del siglo XX. Este proyecto busca abordar esta brecha, proporcionando una plataforma accesible y educativa que pueda ser utilizada para el aprendizaje y la investigación en estas regiones.

Las máquinas de ritmo son uno de los primeros instrumentos musicales electrónicos y son ampliamente utilizados en la producción musical hoy en día. La OR-1 surge como una herramienta para integrar la historia, teoría y práctica para el desarrollo de habilidades técnicas y creativas. Este proyecto, a través del diseño y desarrollo de la máquina de ritmos OR-1, busca enfrentar los retos educativos y tecnológicos actuales en la región.

El proceso de creación de la OR-1 conlleva la programación de microcontroladores, procesamiento de audio, el diseño electrónico y mecánico, así como una parte técnica de ensamblaje. Este proyecto hace uso de tecnología accesible e impulsa la innovación con su estructura de código abierto. Esto facilita la personalización y replicación de este instrumento electrónico mejorando la accesibilidad y adaptabilidad de la tecnología en un contexto donde las oportunidades de desarrollo tecnológico musical son escasas.

La Universidad del Valle de Guatemala, reconocida como un motor tecnológico en el país, proporciona infraestructura crucial para la viabilidad de este proyecto. Sus instalaciones, que incluyen impresoras 3D y equipamiento para la fabricación de placas de circuito impreso (PCB), permiten a los estudiantes transformar sus ideas en realidades tangibles. Este apoyo institucional no solo facilita la aplicación de conocimientos científicos a disciplinas creativas como la Licenciatura en Composición y Producción Musical, sino que también promueve un entorno educativo donde la tecnología y la creatividad se entrelazan de manera efectiva.

La OR-1 se establece como una herramienta educativa beneficiosa en el curso de Música Electrónica, conectando el legado histórico con las innovaciones actuales en la producción musical. Basada en las icónicas máquinas de ritmo de la serie TR de Roland de los años 80, la construcción de esta máquina facilita la comprensión profunda de los instrumentos musicales electrónicos, impulsando la fusión de la ciencia y creatividad en campos innovadores.

4.1. Historia de las máquinas de ritmo

Las máquinas de ritmo siempre han ocupado su propio lugar en la historia de la síntesis de sonido y la creación de música, estando enraizadas tanto en el campo de la síntesis de sonido como en la secuenciación. [12] Este instrumento electrónico está diseñado para ser una herramienta musical capaz de crear patrones rítmicos y secuencias percusivas de manera fácil y rápida. Se utilizan tanto para la producción musical como para interpretaciones en vivo sirviendo de acompañamiento para los músicos o como un instrumento musical en sí mismo.

4.1.1. La primera máquina de ritmo

Se puede decir que la primera “máquina de ritmo” fue creada en el siglo XIII. En el año 1206 Ismail al-Jazari, en lo que hoy conocemos como Turquía, documenta en “El Libro del Conocimiento de Ingeniosos Dispositivos Mecánicos” una invención que consistía en una máquina hidráulica que accionaba cuatro músicos autómatos, de los cuales dos eran bateristas y sus ritmos y patrones podían ser programados al mover las clavijas del mecanismo. Este aparato fue utilizado para entretener al Sultán y sus invitados durante sus diversas fiestas[12]. Su esbozo se muestra en la Figura 1.



Figura 1: Banda de Autómatas de al-Jazari [1]

Durante los siglos XVIII y XIX surgieron múltiples dispositivos mecánicos que reproducían música.

ca, como los relojes musicales y autómatas que referenciaban de manera muy similar la invención de al-Jazari. Los mecanismos de estos aparatos se basaban en relojería, lo cual les permitía reproducir ritmos y melodías de manera automatizada. En la década de 1930 esta práctica mecánica se ve afectada por la llegada de la electrónica y los nuevos avances tecnológicos en la grabación y reproducción de sonido que sirvieron como base para nuevos modelos de máquinas de ritmo.

4.1.2. El Rythmicon

Una de las primeras máquinas de ritmo electrónicas fue creada por León Theremin, comisionada por el teorista musical Henry Cowell en el año 1931 llamada El Rythmicon. Se basaba en la teoría musical de Cowell de que los ritmos complejos podían derivarse de series armónicas. Este aparato tenía la capacidad de producir patrones rítmicos complejos mediante la síntesis de sonido utilizando un mecanismo único de fuentes de sonido y ruedas perforadas rodantes. Utilizaba un teclado para producir una nota rítmica repetida y múltiples teclas producían una serie de sobretonos. En su momento, El Rrythmicon no generó un impacto comercial significativo ya que su complejidad limitaba su uso y fue fácilmente olvidada; no obstante, es el primer precedente que genera una cadena de diversos intentos de máquinas de ritmo en los años posteriores. [19]

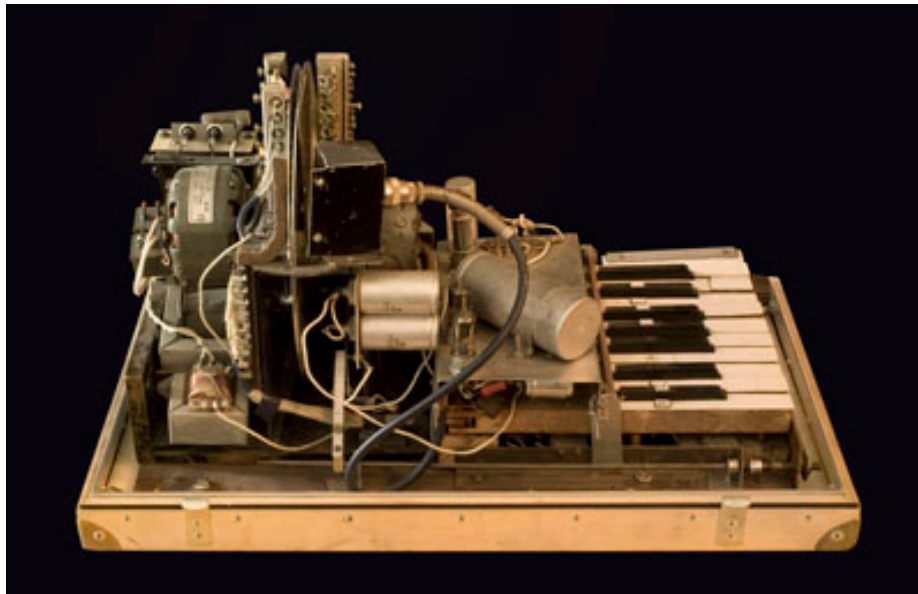


Figura 2: El Rythmicon [25]

4.1.3. La Side Man de Wurlitzer

Rudolph Wurlitzer Company introdujo la Side Man en 1959. Fue una de las primeras máquinas de ritmo producidas comercialmente, diseñada principalmente como un accesorio para órganos. Tanto la Side Man como otras máquinas de ritmo similares solían utilizar un mecanismo mecánico de discos giratorios con agujeros para crear patrones rítmicos. La luz que brillaba a través de un lado del disco era detectada por fotoreceptores en el otro lado a medida que los agujeros giraban, generando ritmos repetibles y sonidos de batería. El tempo se ajustaba modificando la velocidad de rotación del disco. [12] Fue relativamente popular entre organistas de poco renombre ya que a pesar de ser grande y voluminosa, como se observa en la Figura 3, era más fácil de transportar y montar que una batería acústica para sus conciertos o recitales. [8]



Figura 3: La Side Man [17]

4.1.4. Serie TR de Roland

En los años posteriores, la tecnología continuó avanzando, así también surgieron nuevas máquinas de ritmo, introduciendo nuevas características y capacidades, lo cual potenció su popularidad. En 1972, Ikutaro Kakehashi fundó Roland Corporation. Roland entonces comienza a fabricar una de las gamas más conocidas de máquinas de ritmo, la serie TR, familia de las icónicas TR-808 y TR-909, como se observan en la Figura 4.



Figura 4: Roland TR-909 y TR-808 [33]

4.1.5. Roland TR-808

La Roland TR-808 Rhythm Composer fue una de las primeras máquinas que permitía a los usuarios programar sus propios patrones, utilizando síntesis analógica para generar sonidos utilizando componentes electrónicos como resistores, capacitores y amplificadores operacionales (op-amps).

Esta máquina integra un secuenciador de 16 pasos con 16 botones que representaban cada paso de la secuencia y luces LED para indicar los pasos. Cuenta con un sistema de memoria para facilitar la programación y almacenamiento de hasta 32 ritmos complejos. Esto fue facilitado gracias al uso innovador de operaciones controladas por el CPU, como se puede observar el diagrama de bloques de la Figura 5, en donde los disparadores y acentos se procesan para modular la dinámica del sonido.

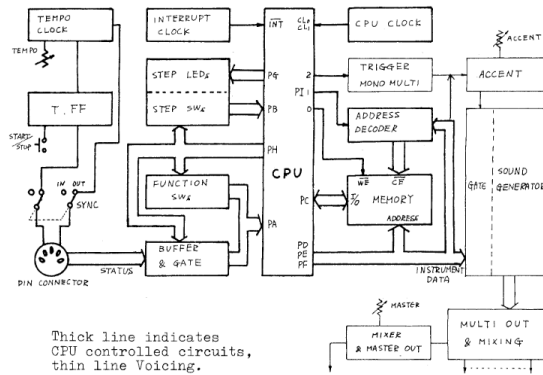


Figura 5: Diagrama de bloques de la TR-808 [42]

Bombo

El sonido más icónico de esta máquina, el bombo, es generado utilizando una configuración tipo T puenteada. Esta configuración consiste en una serie de resistencias y capacitores que crean un circuito resonante, creando una onda sinusoidal decreciente cuando se activa. El control de la frecuencia de la onda se controla por medio de los valores de la resistencias y capacitores, y su decaimiento es controlado por un envolvente que utiliza un transistor para cargar y descargar los capacitores, como se muestra en la Figura 6, a la tasa determinada por un potenciómetro.

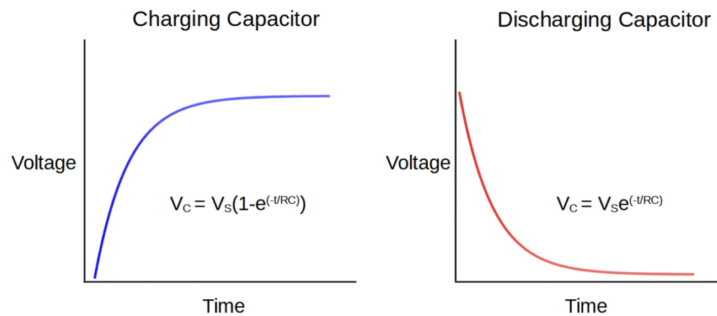


Figura 6: Carga y descarga de un capacitor [18]

Caja

El sonido de caja se produce combinando una red T punteada similar a la del bombo para la frecuencia baja, y un generador de ruido blanco para el chasquido de alta frecuencia. El generador de ruido hace uso de un transistor polarizado inversamente para la conseguir un ruido de banda ancha. Este sonido luego se filtra y se mezcla con el sonido tonal.

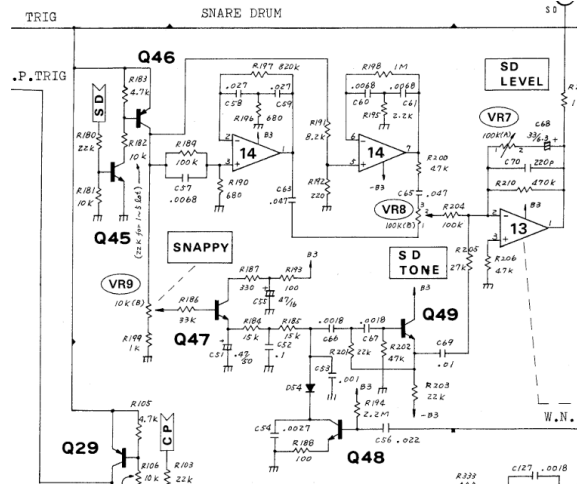
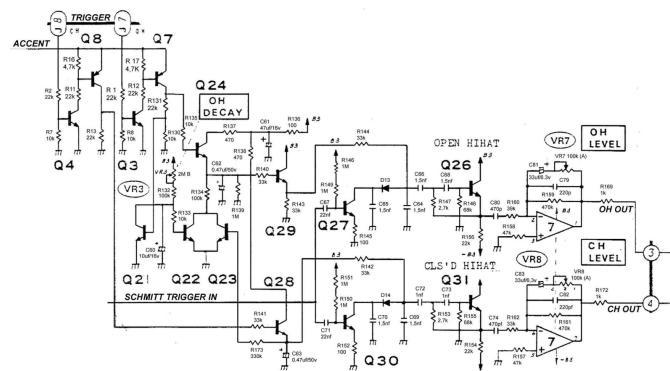


Figura 7: Circuito para caja de la TR-808 [42]

Hi-Hats y platillos

Los sonidos de hi-hats y platillos se generan utilizando ruido blanco filtrado por bandas. La fuente de ruido es un transistor polarizado inversamente, al igual que el de la caja, pero el filtrado se realiza a través de una serie de filtros pasa altas y pasa bajas, que permiten modelar el sonido de la manera deseada.



4.1.6. Roland TR-909

Pocos años después, en 1983, Roland volvió al mercado con la Roland TR-909, una versión más avanzada de la TR-808 que integraba un enfoque híbrido analógico-digital. Combinaba sonidos generados mediante circuitos analógicos regulables para el bombo, caja, palmas y toms, junto con muestras digitales para los platos, que eran más difíciles de sintetizar [11]. La TR-909 incluía un secuenciador de 16 pasos y un modo de edición por pista, lo que permitía encadenar varios patrones en serie [34]. Además, incorporaba una funcionalidad llamada "accent", que permitía humanizar los ritmos. Esta fue una adición inteligente por parte de Roland, ya que el alto coste de la memoria limitaba a la competencia a incluirla en sus máquinas basadas en muestras digitales.

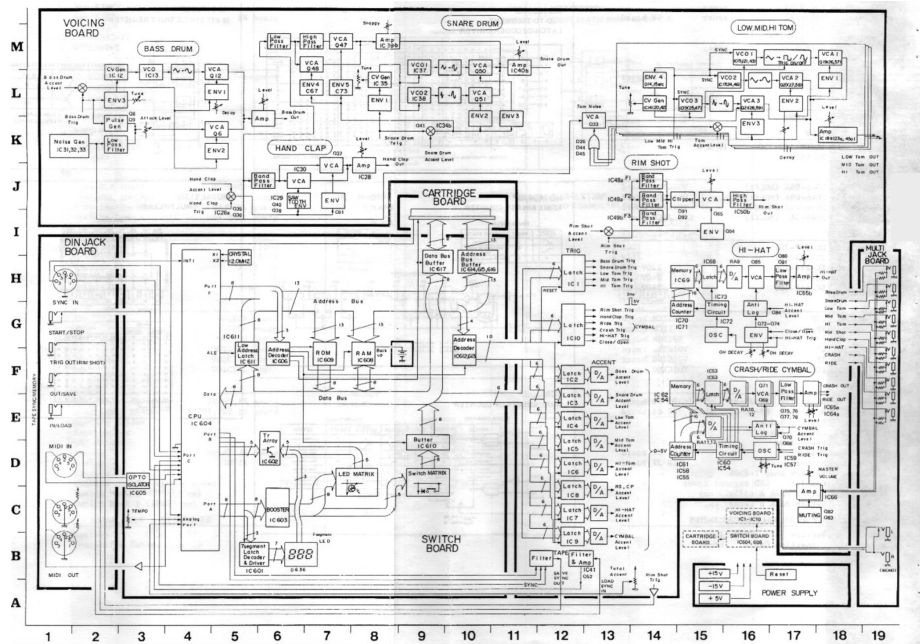


Figura 9: Diagrama de bloques de la TR-909 [43]

Esta máquina se construyó con un sistema de control microprocesado, capaz de administrar la generación de sonido y la secuenciación. El bloque de sonido utiliza ROMs para el almacenamiento de muestras de alta fidelidad para sonidos como los platos, y osciladores de voltaje controlado (VCOs) para los sonidos de percusión analógica. Este diseño más complejo, como se puede observar en la Figura 9, permitía manipular los sonidos de una manera más precisa que su antecesora TR-808. Además, logra innovar al ofrecer salidas individuales para los sonidos, lo cual fue significativo para los productores a la hora de mezclar.

Tambores analógicos

Los sonidos como el bombo, caja y toms son generados de manera similar que en la TR-808, sin embargo incluyen mejoras para mejor manipulación del sonido. Por ejemplo, el circuito del bombo, como se observa en la Figura 10, incluye un parámetro de ataque que permite modular el golpe inicial del sonido, dándole un ataque más agudo.

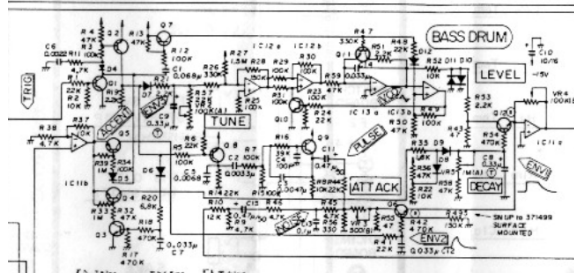


Figura 10: Circuito para bombo de la TR-909 [43]

Muestras digitales

A diferencia de la TR-808, esta máquina utiliza muestras digitales de 6 bits para hi-hats y platillos. Estas están almacenadas en la ROM en direcciones específicas, como se muestra en la Figura 11, y se activan sincronizadamente con los sonidos analógicos. Esta reproducción es controlada mediante un convertidor digital a analógico (DAC).

OPEN HI-HAT	000 0000 0000 0000
	↓
COMMON ADDRESS	110 0000 0000 0000
	↓
CLOSED HI-HAT	111 1111 1111 1111

Figura 11: Direcciones ROM para Hi-hats abiertos y cerrados en la TR-909 [43]

Implementación MIDI

La TR-909 introduce por primera vez en su línea TR una music instrument digital interface (o MIDI por sus siglas en inglés). Este protocolo de comunicación y especificación de hardware permite la representación digital de eventos, permitiendo así su sincronización con otros instrumentos digitales. Estos puertos pueden ser evidenciados en la parte izquierda del diagrama de bloques de la Figura 9.

Impacto de la serie TR de Roland y el contexto actual

La TR-808 no tuvo éxito en su momento porque los músicos y productores de la época buscaban los sonidos más realistas posibles, mientras que los sonidos de la 808 eran demasiado artificiales y sintéticos. Ese mismo año, la Linn LM-1 de Linn Electronics revolucionó el mercado de las cajas de ritmo al ser la primera en usar samples digitales de baterías acústicas reales en lugar de sonidos analógicos sintetizados en tiempo real, además de ofrecer todas las funciones de su contraparte de Roland [6]. A pesar de esto, con la llegada de la TR-909, lograron balancear su posición como pioneros tecnológicos en el campo de los instrumentos musicales electrónicos.

La serie TR de Roland dejó una marca indeleble en géneros como el hip-hop, la música electrónica y sus subgéneros. Hoy en día, una máquina de ritmo física no es precisamente la norma, ya que estas han sido reemplazadas por emulaciones completamente digitales. Esto permite tener

una de las icónicas máquinas de los años 80 en la computadora, sonando tan auténtica como si se tuviera el aparato físico. Por eso, sus sonidos característicos siguen apareciendo en composiciones y producciones contemporáneas, recordándonos que su legado sigue vigente.

4.2. Audio digital

El audio digital es la representación de sonidos en forma de datos digitales, los cuales se pueden almacenar y procesar en computadoras y otros dispositivos electrónicos. A diferencia del sonido analógico, que se caracteriza por ser una onda continua y variante según las fluctuaciones del ambiente sonoro, el audio digital se compone de una serie de muestras discretas. Estas muestras son transformadas en una secuencia de números que se expresan en código binario formado por ceros y unos, como se observa en la Figura 12. Este formato permite que el audio sea fácilmente manipulable mediante software especializado, facilitando la creación, edición y mejora de grabaciones [38].

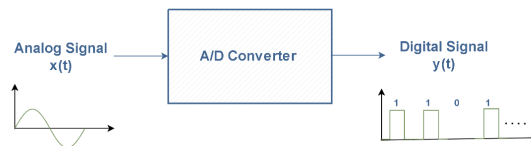


Figura 12: Conversión de señal analógica a digital [23]

4.2.1. Propiedades de la forma de onda

La forma de onda tiene tres propiedades clave, las cuales se pueden describir de forma matemática para su visualización gráfica, como se observa en la Figura 13, estas son:

- **Amplitud (A):** se refiere a qué tan alta es una onda desde $y=0$. Para una onda típica que puede describirse con la ecuación $y(t) = A\sin(\omega t + \phi)$, A es la altura máxima. A mayor amplitud, más alto es el sonido.
- **Frecuencia (f):** se refiere a cuántos ciclos de onda se completan en un segundo y se mide en Hertz (Hz). Para la misma onda, la frecuencia se calcula con $f = \frac{\omega}{2\pi}$, donde ω es la velocidad de estas vibraciones en radianes por segundo. A mayor frecuencia, mayor el tono (más agudo).
- **Longitud de onda (λ):** se refiere a la distancia entre dos puntos similares en ciclos consecutivos de la onda. Se puede calcular con $\lambda = \frac{v}{f}$, donde v es la velocidad a la que viaja la onda y f su frecuencia. A mayor frecuencia, más corta la longitud de onda.

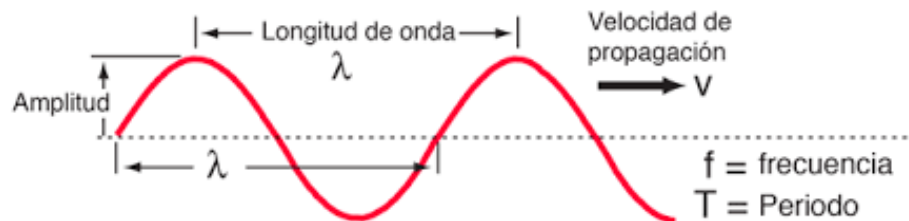


Figura 13: Visualización gráfica de las propiedades de una onda senoidal [20]

4.2.2. Limitaciones del audio digital

El audio digital presenta diversas ventajas como la facilidad de distribución y almacenamiento. Sin embargo, existen limitaciones que pueden afectar su uso y calidad. Entre estas se encuentran:

1. Resolución limitada: dependiendo de la tasa de muestreo y profundidad de bits utilizadas para su digitalización.
2. Aliasing: fenómeno de distorsión al filtrar erróneamente frecuencias más altas que la mitad de la tasa de muestreo, siendo interpretadas como frecuencias más bajas.
3. Latencia: retraso entre la entrada y la salida de audio.
4. Compresión con pérdida: al comprimir un archivo, se pueden perder partes del sonido, afectando la calidad, especialmente en tasas de bits bajas.

4.2.3. Fundamentos de tiempo continuo y discreto

En procesamiento de señales, se deben distinguir las señales de tiempo continuo y discreto. Las señales de tiempo continuo son aquellas donde el tiempo puede tomar cualquier valor, como las ondas sonoras acústicas y las señales de audio analógicas que se componen por tensión y corriente. Por otro lado, el tiempo discreto se compone de valores específicos a intervalos regulares, característico del procesamiento de señales digitales [5].

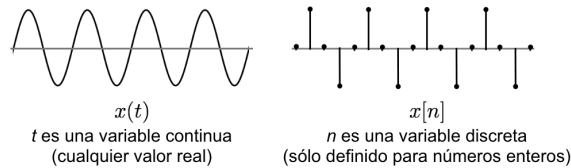


Figura 14: Representación de onda en tiempo continuo y discreto [5]

4.2.4. Muestreo y reconstrucción

El muestreo consiste en convertir una señal continua en discreta, tomando muestras a intervalos regulares. Una mayor tasa de muestreo denota una mejor calidad de la señal muestreada ya que se pierde menos información de la misma, como se muestra en la Figura 15.

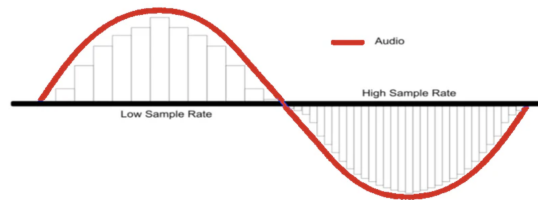


Figura 15: Muestreo de una señal sinusoidal a una tasa baja y alta [36]

El teorema de Nyquist-Shannon indica que la frecuencia de muestreo debe ser al menos el doble de su frecuencia más alta para poder reconstruirla de forma única y evitar aliasing, fenómeno que se puede observar de manera gráfica en la Figura 16.

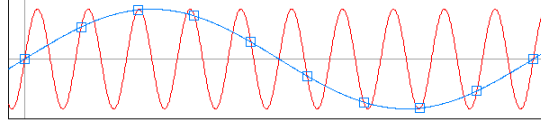


Figura 16: Ejemplo de aliasing en una señal de audio digital [36]

Matemáticamente, si f_{max} es la máxima frecuencia de la señal, la frecuencia de muestreo f_s debe satisfacer:

$$f_s \geq 2 \times f_{max}$$

La reconstrucción implica convertir la señal muestreada de vuelta a una forma continua, típicamente utilizando técnicas de interpolación.

Frecuencia de muestreo y profundidad de bits

La frecuencia de muestreo que se elige está directamente relacionada con la calidad de la señal que se obtiene digitalmente. Escencialmente es la cantidad de muestras de audio que se toman por segundo. Para la captura de el rango completo de frecuencias audibles por el ser humano, es recomendable utilizar una frecuencia mayor a 40kHz. Los estándares son 44.1kHz para CDs y 48kHz para audio profesional.

La profundidad de bits determina cuántos niveles discretos de amplitud puede tener cada muestra en una señal digital. En otras palabras, se refiere a la cantidad de bits que se utilizan para representar cada muestra.

Un mayor número de bits mejora la fidelidad del audio al permitir un rango dinámico más amplio, como se observa en la Figura 17 y reducir el ruido de cuantificación. Este último es el error de aproximar valores continuos a discretos, causando distorsiones menores en la señal, que se minimizan con más bits.

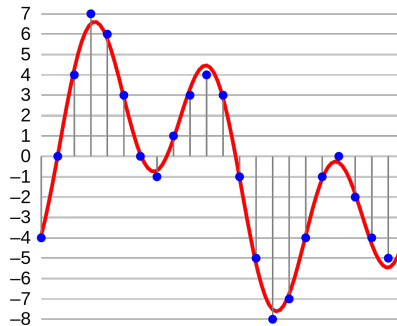


Figura 17: Profundidad de bits en muestreo [23]

4.2.5. Técnicas de buffering y almacenamiento en tiempo real

El buffering es una técnica de manejo de audio que consiste en acumular datos en un búfer, es decir, una zona de memoria como se observa en la Figura 18, antes que estos sean procesados o reproducidos. Esto asegura que el audio se reproduzca de forma continua y sin cortes o interrupciones que afecten la experiencia del usuario o se pierda información [5].

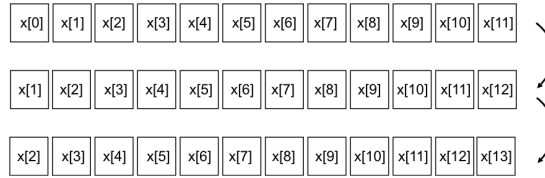


Figura 18: Ejemplo de Buffer Digital [5]

La latencia es el retardo entre la entrada y salida del audio, y junto con el tamaño del búfer, son dos aspectos importantes al diseñar sistemas de audio en tiempo real. Un búfer más grande disminuye el riesgo de interrupciones por tener más datos a procesar, pero esto incrementa la latencia. En eventos en vivo o comunicaciones en tiempo real, es crucial reducir la latencia para garantizar respuestas rápidas.

4.2.6. Análisis en los dominios de tiempo y frecuencia

El análisis de audio digital frecuentemente implica la transformación de señales del dominio del tiempo al dominio de la frecuencia, y viceversa, utilizando transformadas de Fourier. En el dominio del tiempo, una onda sonora se representa con el tiempo transcurrido en el eje horizontal y la amplitud de la onda en el eje vertical, lo cual solo indica cuan fuerte es el sonido y que tanto dura el mismo. Sin embargo, esta representación no nos da información acerca de otras características importantes. Al transformar la señal al dominio de la frecuencia, se pueden observar las frecuencias que componen el sonido, lo que permite hacer un análisis más profundo.

Transformada de Fourier para audio digital

Para señales digitales, empleamos la Transformada de Fourier Discreta (DFT), que convierte una secuencia de valores en el tiempo en componentes de frecuencia. La DFT se define como:

$$X[k] = \sum_{n=0}^{N-1} x[n] \cdot e^{-j \frac{2\pi}{N} kn}$$

donde $x[n]$ representa las muestras de la señal, N es el número total de muestras, y $X[k]$ indica las amplitudes en el dominio de la frecuencia.

Optimización con la Transformada Rápida de Fourier (FFT)

La FFT es una versión optimizada de la DFT que reduce la complejidad computacional de la misma. Esta eficiencia es crucial para el análisis en tiempo real y el procesamiento avanzado de audio. Siempre que se vea un espectro en audio digital, como el de la Figura 19, sabemos que se ha calculado con la FFT [5].

Esta visualización gráfica es útil para diversas aplicaciones tal como la ecualización para mezclas, reducción de ruido, compresión, estudios de acústica, entre otras.

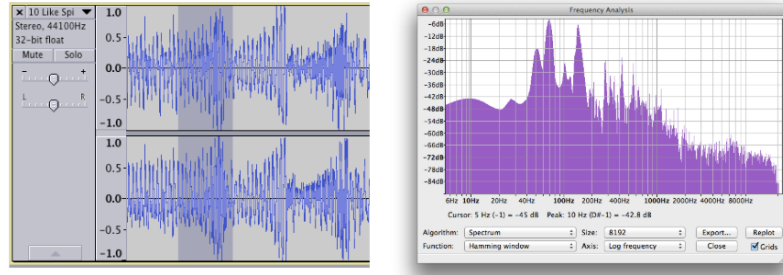


Figura 19: Representación gráfica de la FFT aplicada a una señal de audio [5]

4.3. Partes de las máquinas de ritmo modernas

Uno de los beneficios de la era digital es que los músicos pueden optar por instrumentos digitales o físicos. Aunque las máquinas de ritmo clásicas de los años 80 son hoy más accesibles en formato software, sigue habiendo un mercado para las máquinas modernas físicas, ya que se utilizan en la producción musical, presentaciones en vivo e interpretaciones informales, donde la gente aprende a tocarlas de la misma forma que se aprende a tocar una guitarra.

Las máquinas de ritmo contemporáneas adaptan funciones clásicas como modernas, y en su mayoría se componen de 8 grupos: controlador, secuenciador, sonidos, efectos, periféricos, almacenamiento, alimentación y funciones básicas.

A continuación se enlistan las características más comunes en las máquinas de ritmo modernas:

Controlador o interfaz de usuario

El controlador o interfaz de usuario es el medio por el cual los músicos interactúan con la máquina. Este incluye:

- Pads: botones en cuadrículas o hileras que se utilizan para reproducir sonidos o programar patrones. Lo más común es en cuadrículas de 4x4 u 8x8 para representar ritmos de 4 compases con 4 pasos por compás. [9]
- Pantalla: permite visualizar información de la máquina como su configuración actual y navegación en general.
- Knobs: perillas de ajuste de parámetros como volumen, cantidad de efecto, tempo, entre otros.
- Faders: atenuadores deslizantes para controlar niveles de mezcla u otros parámetros.
- Botones de transporte: utilizados para cambiar de estados o configuración actual.

Secuenciador

Un secuenciador de pasos es un sistema basado en cuadrículas utilizado para programar patrones rítmicos o melódicos al habilitar o deshabilitar pasos individuales entre múltiples divisiones de tiempo. Cada paso suele representar una subdivisión de un beat en una unidad de medida, y los patrones rítmicos pueden ser programados de manera sencilla seleccionando cuales pasos están activos. [31] Estas matrículas suelen ser de 4x4, lo cual representa 16 botones para 16 pasos. [2]

Sonidos

Son utilizados para generar texturas y ritmos específicos que se pueden programar y manipular a través del secuenciador o controlador. [48]

- Samples nativos: incluye los samples que trae la máquina por defecto.
- Módulos de síntesis: permite crear sonidos a partir de diferentes ondas y poder modificarlos con envolventes y efectos.
- Importación de samples: posibilidad de utilizar sonidos propios vía tarjeta SD o USB.

Efectos

Los efectos son herramientas comúnmente utilizadas para manipular los sonidos y darles diferentes texturas o características espaciales. [48]

- Efectos individuales: incluye compresión, ecualización, distorsión, entre otros.
- Efectos globales: reverb, delay, chorus.

Periféricos

Las máquinas de ritmo cuentan con periféricos que permiten integrarlas con otros sistemas y equipos. Los más comunes son:

- Salidas de audio: sirven para escuchar el audio principal generado por la máquina.
- Entradas de audio: estas permiten mezclar señales externas.
- MIDI: permite la sincronización con otros dispositivos de tecnología MIDI.
- USB: para sincronización MIDI o conexión con una computadora para la carga de samples.
- Control Voltage Gate: utilizada para la sincronización con sintetizadores modulares.

Almacenamiento

Con el paso de los años, la memoria que antes era muy limitada y costosa para implementar, ahora es un recurso común y extenso en las máquinas de ritmo modernas. Existen dos tipos:

- Memoria interna: almacena los patrones del secuenciador, configuraciones de la máquina y samples.
- Tarjeta SD/USB: permite añadir samples externos de manera sencilla.

Alimentación

Al ser dispositivos electrónicos, las máquinas de ritmo requieren una fuente de alimentación para su operación. Estas suelen ser:

- USB: muchas máquinas utilizan la tecnología USB para alimentarse y también enviar y/o recibir información simultáneamente.
- Adaptador de corriente: pueden tener también un conector directo.
- Batería: algunas máquinas funcionan a base de baterías para su fácil portabilidad.

Funciones adicionales

Existen diversas funciones adicionales que se utilizan comúnmente en las máquinas de ritmo actuales. Entre las más comunes se encuentran las siguientes:

- Tempo Sync: permite sincronizar el tempo al de cualquier otro dispositivo conectado mediante MIDI o USB.
- Swing: permite la humanización de patrones rítmicos, aplicando una ligera variación en el tiempo de los golpes para generar un ritmo más natural. [48]
- Accent/Dynamics: permite la variación de la intensidad de los golpes con el fin de aumentar la expresividad.
- Pattern Chaining: permite encadenar diversos patrones rítmicos para crear secuencias más lagras y obtener composiciones completas.

4.4. Microcontroladores

Un microcontrolador es un circuito integrado compacto diseñado para ser la mente de operación en un sistema embebido [40]. Estos dispositivos cuentan con un procesador con memoria y periféricos de entrada y salida en un solo chip, lo cual los hace muy versátiles y eficientes para aplicaciones específicas. Se deben programar detalladamente con un lenguaje de programación, como C, C++, python, entre otros.

4.4.1. Microcontroladores para aplicaciones de audio

Hoy en día existe una diversidad de microcontroladores con optimizaciones para aplicaciones audio, sirviendo de gran ayuda para aspectos de ADC, DAC, sampling y compresión de audio, así como accesibilidad para ampliar su memoria con memorias MicroSD externas. [24]

Teensy 4.1 con Audio Board

El teensy 4.1 es una potencia en el campo de los microcontroladores para aplicaciones de audio, específicamente cuando es combinado con el Audio Board. Cuenta con un procesador ARM Cortex-M7 a 600 Mhz y 1MB de RAM y 8MB de memoria Flash, está diseñado específicamente para procesar audio digital complejo. El Audio Board incorpora un códec de audio SGTL5000 que proporciona

entrada y salida estéreo de alta calidad. Es ideal para proyectos de audio DIY, sintetizadores y procesamiento extensivo de efectos de audio. Además existe una aplicación de diseño de audio, que hace la tarea de crear sistemas de procesamiento de audio de manera más sencilla con programación de bloques. [37]

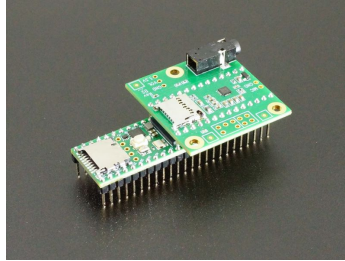


Figura 20: Teensy 4.1 con Audio Board [39]

Arduino Uno

El Arduino Uno R3 es la versión más reciente de uno de los microcontroladores más conocidos para proyectos DIY. Opera con un procesador ATmega384P a 16 MHz con 2KB de SRAM y 32KB de memoria Flash. Cuenta con un convertor ADC de 10 bits y funciones específicas para audio. Es ideal para principiantes o proyectos que requieren efectos básicos de audio y procesamiento de sonido gracias a su simplicidad y la cantidad amplia de tutoriales y proyectos disponibles. [3]

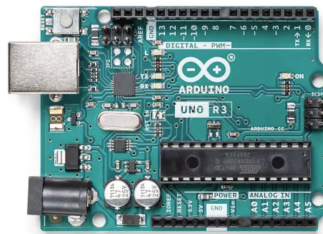


Figura 21: Arduino Uno R3 [3]

Raspberry Pi Pico

El Raspberry Pi Pico es otro microcontrolador popular para aplicaciones de audio, especialmente para quienes requieren un balance entre desempeño y facilidad de uso. Cuenta con un procesador Dual-Core ARM Cortex-M0+ RP2040 a 133MHz y 264KB de SRAM y 2MB de memoria Flash, puede soportar procesamiento de audio moderados. [41]

Todos estos microcontroladores cuentan con entradas y salidas programables, lo cual permiten hacer interfaces interactivas con datos de audio por protocolos como I2C (Inter-Integrated-Circuits), gpios y capacidad de soportar módulos o dispositivos externos para aplicaciones más específicas.



Figura 22: Raspberry Pi Pico [41]

4.4.2. Arduino IDE y su lenguaje de programación

Arduino IDE

Un IDE se define como un entorno de desarrollo integrado por sus siglas en inglés. El Arduino IDE, actualmente en su versión 2.3.2, es un programa conformado por un conjunto de herramientas de programación e incluye un editor de código, un compilador, un depurador y un constructor de interfaz gráfica (GUI). Este se utiliza principalmente para escribir y cargar programas a microcontroladores Arduino. A pesar de esto, es muy popular gracias a su posibilidad de extender su uso con otros microcontroladores mediante la instalación de paquetes de terceros y su disponibilidad en los sistemas operativos Windows, Mac OS y Linux. Entre los microcontroladores compatibles se encuentran dispositivos como el Raspberry Pi Pico, Teensy y ESP32, entre otros. [4]

Se considera la programación en este IDE más sencilla que programar en otros lenguajes que demandan un conocimiento extenso de detalles de bajo nivel de hardware y del sistema, los cuales son esenciales en entornos más avanzados como el desarrollo en C/C++ puro para microcontroladores, o en plataformas más complejas como ARM Cortex. El lenguaje utilizado en el Arduino IDE ofrece simplicidad y bibliotecas integradas que los usuarios utilizan para desarrollar proyectos funcionales de forma rápida, además de una comunidad de soporte activa en línea.

4.4.3. Dispositivos externos

En los aparatos de audio e instrumentos electrónicos contemporáneos, es común ver módulos externos que ayudan al usuario a interactuar con el mismo. Una de las ventajas de los microcontroladores son los periféricos de entrada y salida que permiten la comunicación con estos tipos de módulos. Algunos de ellos pueden ser:

Encoders

Un encoder rotativo es un dispositivo electromecánico que convierte el movimiento angular en señales digitales que pueden ser interpretadas por sistemas de control, como microcontroladores. Estos dispositivos generan pulsos que proporcionan información sobre el grado de rotación y la dirección del giro, permitiendo un control preciso del movimiento.

A diferencia de un potenciómetro, que tiene un rango de movimiento limitado, un encoder rotativo puede girar continuamente lo que lo hace ideal para aplicaciones en interfaces de usuario de

dispositivos electrónicos incluyendo equipos de audio como mezcladoras y sintetizadores. El encoder rotativo, por tanto, actúa como una especie de 'potenciómetro digital' que puede controlar múltiples funciones.

Un ejemplo es el encoder rotativo KY-040, mostrado en la Figura 23, que incluye un botón push integrado añadiendo funcionalidad al dispositivo. Este modelo opera a un voltaje de 5V y puede girar de manera continua, lo que facilita su uso en una amplia gama de aplicaciones electrónicas.

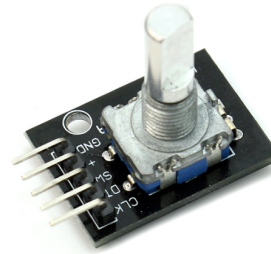


Figura 23: Módulo de Encoder Rotativo KY-040 [10]

NeoTrellis

El NeoTrellis 4x4 de Adafruit, como se observa en la Figura 24, es una matriz de botones iluminados con LEDs RGB. Su función principal es servir como interfaz de usuario para proyectos electrónicos. Cuenta con comunicación por I2C, lo cual permite su fácil integración con microcontroladores. También tiene la capacidad de enlazarse con más dispositivos de su tipo para crear matrices más grandes. Funciona con un voltaje de 3.3V a 5V.

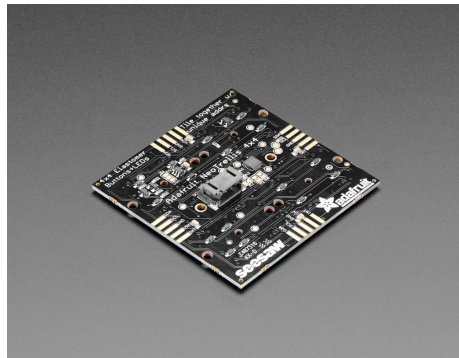


Figura 24: NeoTrellis de Adafruit [26]

Pantallas de visualización

Las pantallas de visualización para microcontroladores son otra adición para las interfaces de usuario intuitivas en un proyecto. Estas permiten visualizar datos que el programador considere necesarias para un fácil funcionamiento. Existen de diversos tamaños y de distintos fabricantes.

Un ejemplo de estas es la SSD1306 de Adafruit, como se muestra en la Figura 25. Es una pantalla OLED de 128x64 píxeles que funciona por medio de protocolo I2C al igual que las NeoTrellis del mismo fabricante. Esta es de fácil programación para diseños sencillos, y se pueden crear diseños más complejos si se cuenta con una base fuerte de programación.

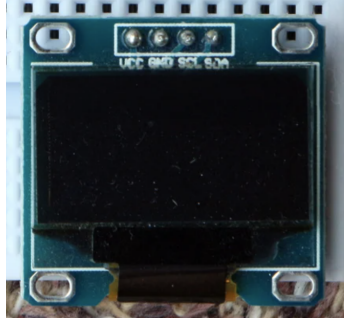


Figura 25: Pantalla OLED SSD1306 de Adafruit [46]

4.5. Placas de circuito: PCBs y placas perforadas

Existen diversos métodos para integrar un circuito dentro de un dispositivo buscando la optimización de espacio y materiales para crear un sistema embebido compacto y con un funcionamiento óptimo.

4.5.1. PCBs (Printed Circuit Boards)

Las PCBs están compuestas por capas de material aislante y pistas conductoras de cobre que interconectan diversos componentes electrónicos de forma estructurada. Se diseñan en un programa especial de computadora en el que se deben trazar las pistas para cada conexión de manera individual basándose en un esquemático del circuito. Existen varias reglas que se deben seguir al realizar un diseño de placa impresa, creadas para asegurar el funcionamiento correcto de la placa. Luego de finalizar con el diseño, se envía a impresión a un centro especializado.

EasyEDA para diseño de PCBs

EasyEDA es una herramienta para el diseño de placas de circuito impresas basada en la web. Esta diseñado para todo tipo de personas, desde aficionados hasta profesionales, y simplifica el proceso de creación de esquemáticos y el diseño de PCBs con su interfaz intuitiva, guardando todos los diseños en la nube.

Esta cuenta con múltiples herramientas de simulación 2D y 3D para que los usuarios puedan validar su circuito antes de mandarlo a impresión. Además permite la colaboración entre usuarios, la posibilidad de enviar el diseño a impresión, y una base de documentación extensa.

4.5.2. Placas perforadas

Una placa perforada es un tipo de placa que consiste en una lámina con agujeros pre-perforados y recubiertos con cobre. Estos agujeros permiten introducir y soldar componentes electrónicos de forma manual, aunque es menos fiable que una placa impresa ya que se puede dar de manera más fácil el error humano.

4.6. Modelado 3D

El modelado 3D es una técnica de creación de modelos digitales de objetos o escenarios tridimensionales haciendo uso de software especializado. Es utilizado en diversos ámbitos como la arquitectura, el diseño mecánico, la animación, entre otros.

4.6.1. OnShape

OnShape es una plataforma de diseño asistido por computadora (CAD) basada en la nube que permite el acceso y la colaboración en tiempo real desde cualquier dispositivo con conexión a internet. A diferencia de los sistemas CAD tradicionales, esta herramienta elimina la necesidad de instalaciones de software pesadas y ofrece una interfaz de usuario intuitiva y fácil de usar para personas de todos los niveles de habilidad.

Esta herramienta cuenta con una interfaz de usuario amigable que permite que la curva de aprendizaje sea sencilla. Dentro de OnShape es posible importar modelos 3D pre fabricados para modificarlos acorde a las necesidades, lo cual fomenta la creatividad y facilita el proceso de modelado para prototipos.

4.7. Métodos de impresión 3D

Existen diversos métodos para imprimir en 3D. Cada uno tiene distintas ventajas, aplicaciones y diferentes acabados, como se muestra en la Figura 26, además de requerir el uso de materiales específicos. [44]

- FFF (la fabricación de filamento fundido): el FFF o FDM (modelado por deposición fundida) utiliza bobinas de filamento, usualmente termoplástico, y este se funde y se extrae a través de una boquilla construyendo el objeto capa por capa. Es útil para prototipos rápidos y producción de bajo volumen; es de fácil accesibilidad y uso.
- SLA (Estereolitografía): utiliza un láser para curar resina líquida en un tanque, donde se solidifica de manera selectiva formando capas. Se conoce por su alta precisión y acabado fino.
- SLS (Sinterización Selectiva por Láser): un láser fusiona partículas de diversos materiales como polvo plástico, cerámico o metal y permite que se creen objetos complejos sin necesitar soportes. Es comúnmente utilizado para producir piezas duraderas y funcionales.



Figura 26: Ejemplos de impresión 3D en FDM, SLA y SLS [29]

4.7.1. Tipos de filamento

Existen distintos tipos de filamento para impresión 3D, y se debe escoger cuidadosamente dependiendo de la aplicación que se requiera de las piezas. [21]

- PLA (Ácido Poliláctico): es de los más populares gracias a su facilidad de uso y su naturaleza biodegradable. Se deriva de recursos renovables tales como el almidón de maíz o la caña de azúcar. Es popular entre entusiastas de la impresión 3D y en educación debido a su bajo costo, baja temperatura de fusión y mínima deformación.
- ABS (Acrilonitrilo Butadieno Estireno): es un material resistente y duradero, se utiliza para piezas que requieren resistencia al desgaste y al impacto. Requiere temperaturas más altas para impresión.
- PETG (Tereftalato de Polietileno Glicolizado): combina la facilidad de la impresión de PLA con la resistencia del ABS. Es resistente a la humedad y a muchos productos químicos, adecuado para usos interiores y exteriores.



Figura 27: Propiedades físicas de los filamentos PLA, ABS y PETG [44]

4.8. Metodología de enseñanza de música electrónica

La aparición de los instrumentos musicales electrónicos ha revolucionado la forma en que el ser humano crea, interpreta y aprecia la música. Desde los primeros experimentos con sonidos electrónicos en el siglo XIX, pasando por la invención del Theremin en la década de 1920, hasta el desarrollo de los sintetizadores, las cajas de ritmo y la música digital en el siglo XX, el progreso de la música electrónica ha sido una constante fuente de innovación.

La enseñanza de este tipo de instrumentos requiere un conocimiento profundo acerca de tecnología y los principios musicales que los sustentan. Los docentes deben dominar una variedad de instrumentos electrónicos como sintetizadores, máquinas de ritmo, controladores MIDI, así como saber utilizar hardware y software para la creación musical.

4.8.1. Bases de un enfoque efectivo

Paul Lehrman, considerado uno de los pioneros de música computacional, señala que enseñar esta disciplina combina diversas habilidades, incluyendo ingeniería mecánica, programación y electrónica [27]. Es por esto que un enfoque efectivo debería incluir:

- Una base teórica: la historia, principios y técnicas de instrumentos electrónicos.

- Laboratorios prácticos: manipulación directa de sintetizadores, máquinas de ritmos, y software.
- Proyectos creativos: composición, diseño sonoro y programación.
- Colaboración Interdisciplinaria: integración con disciplinas como la ingeniería, computación y diseño.

Carola Boehm señala que es esencial la creación de un corpus que defina los límites, metodologías y contenido de la tecnología musical para su integración en el marco académico [7], lo cual potenciaría la evolución de la rama.

4.8.2. Contexto global

En la actualidad, diversas universidades de prestigio alrededor del mundo cuentan con programas especializados en la tecnología musical. Estos combinan diversas aristas de la disciplina tales como teoría musical, historia, producción y uso de instrumentos electrónicos, sin embargo, cada universidad tiene un enfoque distinto.

New York University (NYU) - Programa de Tecnología Musical

El programa de Tecnología Musical en NYU ofrece una formación completa mezclando la teoría con la práctica, aunque su enfoque final va más enlazado con la interpretación en vivo y producción musical. [35] A pesar de esto tiene cursos que se adentran al campo de los instrumentos electrónicos tales como:

1. Electronic Music Synthesis, Fundamental Techniques:
 - Se basa en el campo de la música creada con sintetizadores.
 - Incluye la generación de sonidos, control de voltaje y el tratamiento de sonido y técnicas de taping.
 - Los estudiantes realizan prácticas de laboratorio y composiciones en módulos de sintetizadores vintage.
 - Creación de uno o más proyectos finales para demostrar la aplicación de estos conceptos.
2. Digital Signal Processing:
 - Introduce a los estudiantes al procesamiento de audio, filtros, efectos y transformaciones más matemáticas.
 - Explora conceptos avanzados de procesamiento de señales.

Berklee College of Music - Electronic Production and Design (EPD)

El programa de Electronic Production and Design es innovador en Berklee. En este, los estudiantes aprenden a diseñar y construir instrumentos utilizando microprocesadores como arduino y Raspberry Pi, adentrándose un poco en la programación musical e ingeniería. [32]

Entre sus diversos cursos adentrados a los instrumentos musicales electrónicos se encuentran:

1. Music Programming:

- Concentra en programación en Max/MSP, Pure Data y otros para crear software o aplicaciones de música personalizadas.
- Desarrollo de habilidades en la creación de software musical.

2. Sound Design:

- Explora el diseño sonoro a través de sintetizadores, efectos y samplers.
- Desarrollo de habilidades en el diseño y manipulación de sonido.

Stanford University - Center for Computer Research in Music and Acoustics (CCRMA)

El enfoque del Center for Computer Research in Music and Acoustics (CCRMA) es más académico e investigativo. Los estudiantes trabajan en laboratorios haciendo uso de sintetizadores modulares, sistemas de audio espacial y aplican programación avanzada para música y audio en SuperCollider, Pure Data y Max/MSP [47]. Entre sus cursos se encuentran:

1. Compositional Algorithms, Psychoacoustics, and Computational Music:

- Desarrollo de algoritmos de composición avanzados.
- Análisis de percepción auditiva y técnicas computacionales enfocadas en música.
- Explora aspectos avanzados de la psicoacústica.

2. Physical Interaction Design for Music:

- Diseño y construcción de instrumentos electrónicos interactivos.
- Uso de sensores, circuitos personalizados y controladores MIDI.
- Enfoque en la interacción física con la música.

3. Hearing and Perception:

- Estudio en profundidad de la percepción auditiva y su aplicación en la música.
- Exploración de las aplicaciones prácticas de la percepción auditiva en la creación musical.

Tufts University - Electronic Musical Instrument Design

La universidad Tufts en Boston, Massachusetts, Estados Unidos ofrece un curso específico que tiene como fin la aplicación de tecnología electrónica en la música. Este es impartido por Paul Lehrman. A través del mismo, los estudiantes crean instrumentos personalizados haciendo uso de microcontroladores tales como Arduino, Raspberry Pi, el Teensy (de cual Lehrman es el creador) y controladores MIDI. Entre los proyectos se incluye la creación de sintetizadores modulares, theremins y controladores interactivos [27].

Es un curso abierto para estudiantes de distintas facultades, y este combina las disciplinas de:

1. Compositional Algorithms, Psychoacoustics, and Computational Music:

- Desarrollo de algoritmos de composición avanzados.
- Análisis de percepción auditiva y técnicas computacionales enfocadas en música.
- Explora aspectos avanzados de la psicoacústica.

2. Physical Interaction Design for Music:

- Diseño y construcción de instrumentos electrónicos interactivos.
- Uso de sensores, circuitos personalizados y controladores MIDI.
- Enfoque en la interacción física con la música.

3. Hearing and Perception:

- Estudio en profundidad de la percepción auditiva y su aplicación en la música.
- Exploración de las aplicaciones prácticas de la percepción auditiva en la creación musical.

Royal Conservatory of The Hague - Institute of Sonology

El Royal Conservatory of The Hague ubicado en Países Bajos, es uno de los pioneros en la enseñanza de música electrónica y tecnología musical. El programa hace uso de sistemas de síntesis modular, controladores MIDI personalizados y software tal como Max/MSP y SuperCollider en la creación de sus proyectos. [45]. Cuenta con cursos esenciales tales como:

1. Historical and Contemporary Electronic Music Composition:

- Estudia composiciones electrónicas tanto históricas como contemporáneas.

2. Sound Synthesis and Signal Processing:

- Introduce técnicas avanzadas de síntesis de sonido y procesamiento de señales.

3. Live Electronic Music Performance:

- Enfoque en el desarrollo de la interpretación en vivo con instrumentos electrónicos.

4.8.3. Música electrónica en la Universidad del Valle de Guatemala

El curso de Música Electrónica es una novedad en la Universidad del Valle de Guatemala que se implementó en 2020, con los inicios de la carrera Licenciatura en Composición y Producción Musical en el año 2018. Esta carrera surge como una necesidad de satisfacer las necesidades de una formación musical teórica y práctica de alto nivel, con el fin de crear músicos eficientes en el campo de la música y la tecnología.

Plan de curso: Música electrónica

El curso de música electrónica es enseñado por el Ingeniero Christopher Darwin Berganza Ispache, egresado del Instituto Politécnico Nacional en la Ciudad de México. Su formación como Ingeniero en Comunicaciones y Electrónica le permite impartir a los estudiantes un conocimiento integral que abarca tanto aspectos musicales como electrónicos y científicos. [22]

Este curso está dividido en 5 unidades:

1. Introducción a Ableton Live:

- Esta unidad se centra en la familiarización con el software Ableton Live, diseñado para la producción y ejecución de música electrónica en vivo. Se exploran sus funciones principales, incluyendo la capacidad de secuenciar y controlar parámetros de sintetizadores tanto internos como externos vía MIDI.

2. Síntesis sustractiva con sintetizadores analógicos:
 - Se profundiza en el uso de sintetizadores analógicos clásicos, abordando aspectos como los generadores de osciladores (VCOs), envolventes (ADSR), modulación de parámetros y filtros. Se graban muestras en Live para su uso posterior.
3. Síntesis digital y uso de samplers:
 - Se introduce la síntesis digital utilizando samplers como herramienta principal. Se estudian conceptos como modulación de frecuencia (FM), manipulación de muestras de audio y uso de envolventes y filtros en sintetizadores digitales.
4. Historia de la música electrónica y proyectos prácticos:
 - Se explora la evolución de la música electrónica desde sus inicios, incluyendo el theremin, el magnetófono y los primeros géneros como la música concreta. Los estudiantes realizan proyectos prácticos que abarcan diversos géneros electrónicos, desde el rock progresivo hasta el hip hop y el techno. Se estudian también los primeros secuenciadores y máquinas de ritmo, y las icónicas TR808 y TR909 de Roland.
5. Proyecto final de composición:
 - Los estudiantes crean una composición de fusión que integra elementos de los diferentes géneros estudiados, desde los años 80 hasta la actualidad. Se pone en práctica todo el conocimiento adquirido a lo largo del curso.

Se ha logrado construir una máquina de ritmos programada digitalmente utilizando el Arduino IDE y el microcontrolador Teensy 4.1 y su tarjeta de audio, complementada con un control analógico a través de 16 pads de batería, dos encoders, tres botones y una pantalla de visualización. La máquina permite la programación de secuencias musicales asignando sonidos específicos a cualquiera de los 16 pads, facilitando la ejecución en tiempo real. Adicionalmente, ofrece un modo libre que posibilita la interacción manual con los sonidos y ajustes en vivo del tempo o BPM mediante un encoder, así como la selección de volumen, filtros de pasa altas y efectos granulares con el uso del segundo encoder.

La funcionalidad integral de la máquina se visualiza en una pantalla incorporada, y su operación puede ser modificada o alimentada por un puerto micro USB (5V). Las salidas de audio incluyen audio digital por medio del mismo puerto de alimentación USB, y se ha incluido un jack de 3.5mm que convierte la señal digital en analógica por medio del DAC del Teensy Audio Board Rev D, permitiendo su conexión con computadoras y DAWs o audífonos y altavoces de audio externos.

El diseño estético y funcional se ha completado con la creación de un modelo en 3D para la carcasa y los componentes como los botones y encoders, logrando un diseño compacto y portátil. Además, se desarrolló un circuito específico para PCB que facilita el ensamblaje mediante headers hembra, simplificando la instalación y cableado.

Para asegurar una implementación efectiva, se elaboró un manual detallado que guía a los usuarios en el ensamblaje y utilización de la máquina con fines musicales, destacando la fusión entre ingeniería electrónica y creatividad musical.

6.1. Características y capacidades para el proyecto

El desarrollo de la máquina de ritmos se inicia con una cuidadosa definición de sus características, capacidades y su diseño preliminar como se muestra en la Figura 28. Este proceso implicó la selección detallada de componentes y funcionalidades priorizando la facilidad de control de usuario y la replicabilidad del proyecto. Las especificaciones seleccionadas para la máquina son las siguientes:

- **Microcontrolador programable:** se seleccionó el Teensy 4.1 con Audio Board, un microcontrolador compatible con el Arduino IDE, conocido por su facilidad de programación y capacidad para manejar el procesamiento de audio en tiempo real de manera eficiente. Esto permite implementar funciones complejas y asegura una operación fluida y estable.
- **Matriz de secuenciador de 16 botones:** cada botón de la matriz está asignado a un sample específico, lo que permite al usuario crear secuencias rítmicas o tocar sonidos individualmente. Esta matriz facilita la interacción musical directa y sirve como una interfaz intuitiva para la programación de ritmos.
- **Perillas multifuncionales:** se incluyen dos perillas; una para el control de volumen, un filtro pasa altas y un efecto granular, y otra exclusivamente para ajustar el BPM. Estas ofrecen un control táctil preciso sobre los parámetros críticos del sonido y el ritmo.
- **Botón de modos:** permite alternar entre un modo de programación, donde los usuarios pueden secuenciar y guardar ritmos, y un modo libre, que permite la reproducción libre de sonidos sin secuencia.
- **Botón de repetición:** activa un modo de repetición que reproduce continuamente un sample específico a una velocidad acorde al bpm.
- **Botón de pausa/reanudación:** controla la operación del secuenciador, permitiendo a los usuarios pausar o reanudar la secuencia en cualquier punto.

- **Pantalla de visualización:** pantalla integrada que muestra información esencial como el BPM, estado del secuenciador y configuración de efectos, mejorando la interfaz de usuario y brindando retroalimentación visual en tiempo real.
- **Salidas de audio:** una salida de audio principal USB para grabación utilizando un DAW o herramienta de grabación de audio, y una salida adicional analógica por medio de un jack para audífonos de 3.5mm.

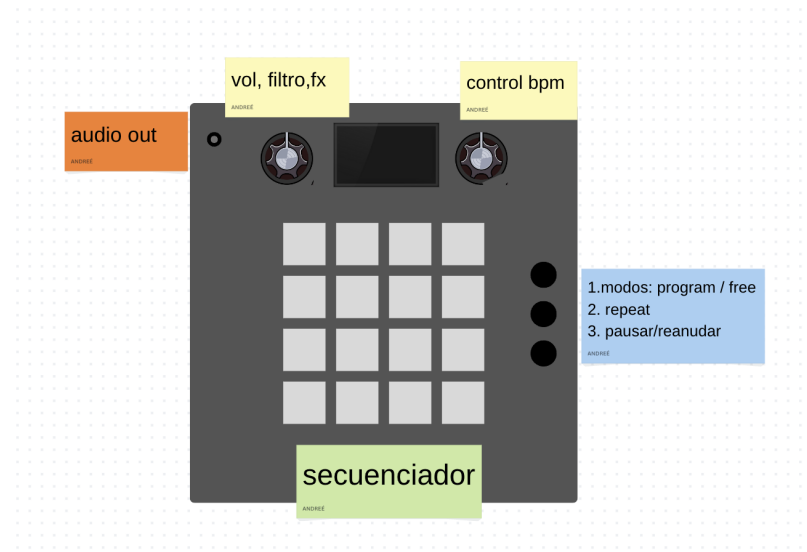


Figura 28: Diseño preliminar de la máquina de ritmos: elaboración propia

6.2. Selección de componentes

6.2.1. Selección de microcontrolador

La selección del microcontrolador se hizo basándose en las necesidades principales de la máquina de ritmos. Entre estas se incluyen:

- Facilidad del entorno y lenguaje de programación
- Alta capacidad de procesamiento de audio en tiempo real
- Documentación y comunidad en línea
- Puertos suficientes y adecuados para los componentes y salidas de audio digital y analógicas
- Costo

El microcontrolador seleccionado para la máquina de ritmos es el Teensy 4.1 junto con el Audio Board Rev D. Esta decisión se basa en una evaluación exhaustiva de varios factores críticos:

- **Facilidad del entorno y lenguaje de programación:** es compatible con el Arduino IDE, lo que facilita su programación y permite aprovechar una amplia gama de bibliotecas y recursos disponibles específicas para el procesamiento de audio.

Criterio (peso)	Arduino Uno R3 (Puntuación)	Raspberry Pi Pico (Puntuación)	Teensy 4.1 y Audio Board Rev D (Puntuación)
Capacidad de procesamiento de audio en tiempo real (5)	Limitada: 16 MHz, sin hardware de audio especializado (2)	Moderada: 133 MHz, sin hardware de audio especializado (3)	Alta: ARM Cortex-M7 a 600 MHz, Audio Board con ADC y DAC de alta calidad (5)
Facilidad de entorno y lenguaje de programación (4)	Alta: Arduino IDE, C/C++ (4)	Alta: MicroPython, C/C++ (4)	Alta: Arduino IDE, C/C++, compatibilidad con librerías de audio (4)
Documentación y comunidad en línea (3)	Excelente: amplia comunidad y recursos (3)	Buena: creciente pero menos extensa que Arduino (2)	Excelente: comunidad activa, especialmente en audio digital (3)
Puertos suficientes y adecuados para componentes y salidas de audio digital y analógico (5)	Limitados: menos I/O, sin salidas de audio especializadas (2)	Limitados: más I/O que Arduino, pero sin especialización en audio (1)	Excelentes: abundantes I/O, incluye salidas de audio digital y analógico (5)
Costo (3)	Económico: USD\$30 (3)	Muy económico: USD\$6 (5)	Moderado: USD\$45 (2)
TOTAL	14	15	19

Tabla 1: Tabla comparativa de microcontroladores

- **Alta capacidad de procesamiento de audio en tiempo real:** cuenta con un procesador ARM Cortex-M7 a 600 MHz y el AudioBoard contiene conversores ADC y DAC de alta calidad.
- **Documentación y comunidad en línea:** el Teensy 4.1 cuenta con una excelente documentación y una comunidad activa, incluyendo una específica para proyectos de audio digital.
- **Puertos suficientes y adecuados para componentes y salidas de audio digital y analógico:** dispone de múltiples puertos de E/S, incluyendo salidas de audio digitales y analógicas.
- **Costo:** aunque su costo combinado con el Audio Board es moderadamente superior al del Arduino Uno y Raspberry Pi Pico, su precio está justificado por las capacidades avanzadas que ofrece, especialmente en términos de procesamiento de audio y flexibilidad de E/S.

En la tabla comparativa, el Teensy 4.1 con el Audio Board Rev D sobresalió con la puntuación más alta de 19 puntos, destacándose por su excepcional capacidad de procesamiento de audio en tiempo real y la abundancia de puertos adecuados para los componentes necesarios. Aunque el Arduino Uno y el Raspberry Pi Pico fueron considerados inicialmente como alternativas para la máquina de ritmos debido a sus características de operación básicas, ambos fueron descartados. Las limitaciones en el procesamiento específico de audio y la menor disponibilidad de puertos en comparación con el Teensy 4.1 y su Audio Shield, hacen del Teensy la mejor opción, garantizando un rendimiento superior y una experiencia de desarrollo más eficiente.

6.2.2. Selección de componentes para la interfaz de usuario

Para la selección de los componentes de la interfaz de usuario, se tomó en cuenta que estos son parte crucial de una experiencia de usuario óptima. Se priorizó que estos componentes fueran

resistentes y fáciles de usar.

1. Encoders KY-040: dos perillas con push button para el control de volumen, efecto, filtro y BPM.
2. Botones de pulsador momentáneo: tres botones permiten la interacción con la máquina, utilizado para las funciones de pausar/reanudar el secuenciador y el cambio de modos de operación.
3. Adafruit NeoTrellis RGB Driver PCB for 4x4 Keypad: este controlador en combinación con el keypad de silicona, permite la visualización de estados y patrones ya que cuenta con retroiluminación RGB, facilitando la interacción con el secuenciador. Cuenta con comunicación I2C.
4. Adafruit SSD1306: esta pantalla de 128x64 pixeles se adecua de manera perfecta al tamaño compacto que se desea para la máquina sirviendo como una guía visual para saber en qué estado se encuentra la máquina y los parámetros de ajuste de control, efectos y filtros. Cuenta con comunicación I2C.
5. Jack Stereo: para emplear como salida de audio para audífonos o sistemas de sonido externos.

6.3. Programación

La programación de la máquina de ritmos se llevó a cabo en la versión 2.3.2 del Arduino IDE en una Macbook Pro 2020 con un chip Apple M1 utilizando el sistema operativo OS Sonoma 14.0. El Arduino IDE es un entorno de desarrollo Open Source, el cual puede ser instalado y utilizado en Windows, Linux y MacOS. El código está escrito en el lenguaje de Arduino, que adapta los lenguajes C/C++ para una mayor facilidad de organización modular del código. Este enfoque modular permite la creación de funciones pseudo-independientes, que se integran en el loop principal. Esta estructura facilita la comprensión y modificación del código.

6.3.1. Documentación y versionado

Durante el desarrollo del código fuente, se empleó una estrategia rigurosa de documentación y versionado utilizando GitHub. Este enfoque facilitó el seguimiento y registro de cada etapa del desarrollo del mismo. A lo largo del proyecto, se realizaron ajustes significativos del código fuente para mejorar la funcionalidad y asegurar la integración eficiente de las distintas partes del sistema. En ocasiones, esto implicó cambios radicales en la estructura del código para resolver incompatibilidades y optimizar el rendimiento general del dispositivo.

Al finalizar el desarrollo de la programación, se añadió el código a un nuevo repositorio de GitHub del Anexo A para tener un modelo Open Source de fácil acceso para su posible recreación y modificación para propósitos educativos. Adicionalmente, se incluye en el repositorio la guía de construcción que incluye los pasos a seguir para poder cargar el código fuente al microcontrolador antes de ensamblar la caja de ritmos.

6.3.2. Configuración del entorno de desarrollo

Para comenzar con la programación utilizando el Teensy 4.1, es necesario configurar el Arduino IDE para soportar este hardware específico. Los pasos a seguir fueron:

1. Instalación del Arduino IDE:

- Descargar e instalar la última versión del Arduino IDE (2.3.2) desde el sitio web oficial de Arduino en <https://www.arduino.cc/en/software>.
- 2. Instalación de Teensy como Boards Manager:
 - En MacOS seleccionar **ArduinoIDE** > **Ajustes** y pegar el siguiente Link en ÜRL para manejo de placas adicionales": https://www.pjrc.com/teensy/package_teensy_index.json.
 - En la pantalla principal de Arduino, seleccionar del lado izquierdo la sección de manejo de placas, y buscar "Teensy" de Paul Stoffregen.
- 3. Instalación de Teensyduino:
 - Descargar Teensyduino, un complemento para el Arduino IDE que agrega soporte para los microcontroladores Teensy, desde la página oficial de Teensy en https://www.pjrc.com/teensy/td_download.html.
 - Ejecutar el instalador de Teensyduino siguiendo las instrucciones de la pantalla y ubicando correctamente dónde está instalado el Arduino IDE.
- 4. Configuración del Arduino IDE:
 - Abrir el Arduino IDE, ir al menú **Herramientas** > **Placa** y seleccionar "Teensy 4.1" del listado de placas disponibles.
 - Configurar el puerto USB en **Herramientas** > **Puerto** para asegurar la comunicación con la placa.
- 5. Uso del Teensy Loader:
 - El Teensy Loader es una herramienta que se instala automáticamente con Teensyduino y se ejecuta de fondo cuando se programa el Teensy desde el Arduino IDE.
 - Su función principal es facilitar la transferencia del código al microcontrolador al cargar un nuevo sketch al Teensy.
- 6. Programación y monitoreo:
 - Luego de escribir código en el IDE, se puede compilar presionando el botón "Cargar" del IDE.
 - El monitor serial del Arduino IDE sirve para monitorear la salida del programa.

6.3.3. Librerías

La selección de librerías es fundamental para el manejo correcto y óptimo del hardware. Las utilizadas en el proyecto son las siguientes:

1. Adafruit_NeoTrellis (V1.3.3) de Adafruit: maneja la matriz de botones y leds del NeoTrellis.
2. Encoder (V1.4.4) de Paul Stoffregen: gestiona los encoders para capturar las entradas de usuario
3. Audio (Nativa del Teensy AudioBoard): esencial para procesamiento de audio digital como la reproducción de samples, mezcla y efectos
4. Wire y SPI: para comunicación con dispositivos I2C y SPI.
5. SerialFlash: permite acceder a la memoria flash donde se almacenan los samples.
6. Adafruit_GFX(V1.11.9) y Adafruit_SSD1306(V2.5.10): para el control de la pantalla OLED que muestra los estados de la máquina.

6.3.4. Funciones

En esta sección, se detallan las funciones que componen el código de la máquina de ritmos, ilustrando cómo cada una contribuye específicamente al funcionamiento global del sistema. Las funciones están agrupadas por su funcionalidad principal para resaltar la cohesión y la estructura modular del diseño del software. Este enfoque mejora la mantenibilidad del código y facilita la escalabilidad y la adaptación a futuras modificaciones o extensiones del proyecto.

1. Inicialización y configuración

Funciones responsables de la configuración inicial del hardware y software.

- `setup()`: configura la comunicación serial, inicializa el hardware y las conexiones de audio.
- `initializeHardware()`: inicializa componentes del hardware como la pantalla SSD1306 y el Trellis, establece los pines de entrada y realiza la animación de inicio.
- `initializeAudioConnections()`: configura los objetos de audio y conexiones entre ellos, incluyendo mezcladores y efectos.
- `assignColors()`: asigna colores a cada pad del Trellis para una mejor distinción visual.

2. Manejo de la Interfaz de Usuario

Funciones que manejan entradas del usuario a través de botones y encoders, y actualizan la interfaz de usuario.

- `toggleProgramMode()`: cambia entre el modo de programación y el modo de reproducción libre.
- `toggleStartStop()`: inicia o detiene la secuencia de reproducción de los sonidos.
- `handleBpmAdjustment()`: ajusta el BPM (beats por minuto) basado en la entrada del encoder principal.
- `toggleFxAdjustmentMode()`: activa o desactiva el modo de ajuste de efectos basado en el estado del botón de efectos.
- `handleEffectsEncoder()`: maneja la selección y ajuste de efectos usando el encoder de efectos.

3. Procesamiento y control de audio

Funciones dedicadas a controlar y manipular la salida de audio.

- `updateSequencer()`: actualiza el secuenciador que controla que muestra de sonido se reproduce en cada paso.
- `handleRepeat()`: maneja la repetición de un sonido específico si se activa el modo de repetición.
- `adjustVolume()`: ajusta el volumen general del sistema.
- `adjustHighPassFreq()`: ajusta la frecuencia del filtro pasa altos.

- `adjustGranularFx()`: modifica los parámetros del efecto granular.
- `adjustFxParameter()`: ajusta los parámetros del efecto activo actualmente basado en la entrada del usuario.

4. Funciones de ayuda y visualización

Funciones que apoyan las principales funcionalidades con visualización adicional.

- `startupAnimation()`: realiza una animación visual en el Trellis al iniciar.
- `printArray()`: imprime el estado actual del secuenciador para propósitos de depuración.
- `displayMenu()`: muestra el menú de efectos en la pantalla.
- `updateDisplay()`: actualiza la pantalla OLED con información como BPM, volumen y estado de los modos.
- `DrawDial()`: dibuja un dial en la pantalla para representar valores como volumen o parámetros de efectos.

Samples

Los samples (o sonidos) utilizados para la máquina forman parte de un kit gratuito de drumkito [16] con los sonidos originales de la TR-808 de Roland Corporation. Se escogieron 16 y se cargaron a una Micro SD para ser utilizados en la máquina de ritmos.

6.4. Diseño del circuito electrónico

El diseño del circuito electrónico fue priorizado simultáneamente con la programación de la máquina de ritmos, debido a la integración del Audio Board Rev D como un componente esencial del microcontrolador.

6.4.1. Selección de pines del Teensy 4.1 y el Audio Board Rev D

El Audio Board Rev D es un módulo de expansión de audio diseñado específicamente para la serie Teensy 4.x y se monta directamente sobre el microcontrolador, como se muestra en la Figura 20. Debido a esta configuración de montaje, fue esencial analizar los pines utilizados por el Audio Board para evitar interferencias en su funcionamiento al integrar otros componentes al circuito.

El análisis del pinout, como se observa en la Figura 29, reveló que los pines críticos son:

- Pin 7: usado para la salida de audio.
- Pin 10: SPI utilizado para la comunicación con la tarjeta microSD que almacena los samples
- Pin 20: controla el reloj para el muestreo a 44.1 kHz.

Estos pines están reservados exclusivamente para funciones de audio y no deben ser utilizados para otros componentes.

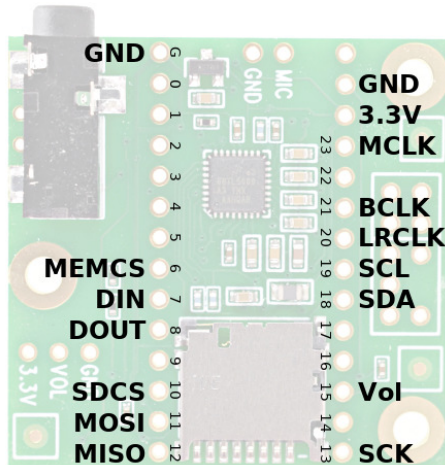


Figura 29: Pinout del Teensy Audio Board Rev D [37]

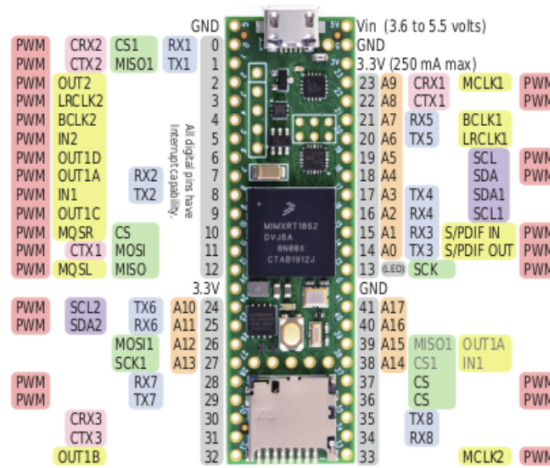


Figura 30: Pinout del Teensy 4.1 [37]

Selección de pines para encoders

El encoder rotativo KY-040 cuenta con 5 pines: Gnd, Vcc, Switch, Output B y Output A. Los pines de output son los que le brindan su funcionamiento de encoder, mientras que el pin de switch se acciona como un botón gracias a su módulo que incluye resistencias de pull-up internas.

Se utilizaron los siguientes pines para las conexiones de los encoders:

- Encoder de BPM: pines 31 y 32 para los pines del encoder B y A respectivamente.
- Encoder de control de volumen y efectos: pines 28, 29 y 30 para los pines del encoder SW, B y A respectivamente. El botón de SW permite la selección del parámetro a modificar.

Estos pines se encuentran del lado izquierdo en el Teensy 4.1.

Selección de pines para botones

Los botones de pulsador momentáneo deben conectarse con una resistencia en configuración pull-down para evitar estados flotantes. En este caso, se utilizó una resistencia de $10k\Omega$.

Los siguientes pines del lado derecho del microcontrolador fueron seleccionados para los botones:

Se seleccionaron los siguientes botones:

- Botón de modos: pin 41
- Botón de repetición: pin 40
- Botón de pausa/renudación: pin 39

Estos pines se encuentran del lado derecho del Teensy 4.1, opuesto a los encoders.

Pines para dispositivos I2C

La conexión de los dispositivos I2C, como el NeoTrellis y la pantalla SSD1306, se efectúa a través del bus principal, ubicado en los pines 19 y 18 del Teensy para SCL y SDA, respectivamente. Cada dispositivo está asignado una dirección única en el bus, lo que permite que operen de manera independiente y sin interferencias entre sí, a pesar de compartir los mismos pines. Estos dispositivos necesitan un voltaje de 3-5V para su funcionamiento óptimo y una conexión a tierra.

Alimentación y tierra común

El circuito completo se alimenta con 5V desde el Teensy 4.1, conectado a través de micro USB, proporcionando un voltaje común y una tierra compartida a todos los componentes, incluidos los dispositivos I2C. Esto se realizó tanto para establecer un punto de referencia estable para los componentes del circuito, reducir la posibilidad de ruido, y simplificar el diseño del circuito electrónico.

Cálculo de la corriente total del circuito

La corriente total consumida por el circuito se calcula sumando la corriente consumida por cada uno de los componentes principales. A continuación, se presenta el detalle del cálculo:

$$\begin{aligned} I_{\text{total}} &= I_{\text{NeoTrellis}} + I_{\text{SSD1306}} + 2 \cdot I_{\text{KY-040}} + I_{\text{Teensy}} \\ &= 300 \text{ mA} + 20 \text{ mA} + 2 \cdot 1 \text{ mA} + 100 \text{ mA} \\ &= 422 \text{ mA} \end{aligned}$$

Donde:

- $I_{\text{NeoTrellis}} = 300 \text{ mA}$ (considerando LEDs a media potencia)
- $I_{\text{SSD1306}} = 20 \text{ mA}$
- $I_{\text{KY-040}} = 1 \text{ mA}$ por encoder

- $I_{\text{Teensy}} = 100 \text{ mA}$

Esto indica que la corriente total requerida para el funcionamiento del circuito es de aproximadamente 422 mA, lo cual está dentro del límite de suministro de corriente proporcionado por una conexión USB estándar.

6.4.2. Creación del esquemático

Se elaboró el esquemático para el circuito eléctrico tomando en cuenta los pines a utilizar y el cálculo de la corriente máxima de consumo. Este diagrama detalla las conexiones específicas para todos los componentes previstos en la máquina de ritmos, incluyendo la señalización Audio Board que va montado sobre el Teensy. Para la realización del esquemático, se empleó el software en línea draw.io [15].

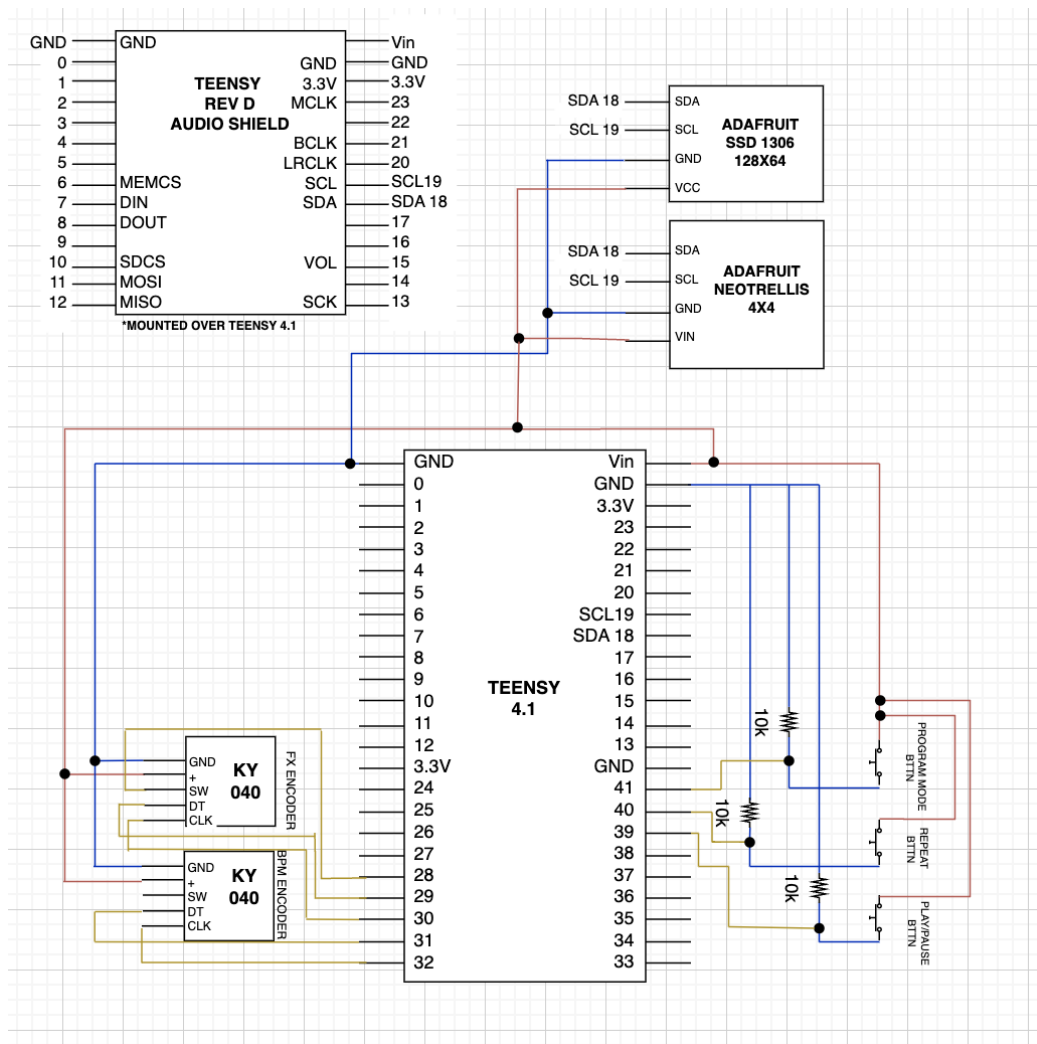


Figura 31: Esquemático completo del circuito de máquina de ritmos

6.4.3. Diseño inicial en placa perforada

Inicialmente, se optó por implementar una placa perforada para montar los componentes electrónicos, utilizando headers hembra en lugar de soldar directamente los dispositivos a la placa, como se observa en la Figura 32. Esta configuración se eligió para optimizar el espacio y facilitar tanto el ensamblaje como el desensamblaje de los componentes. Este enfoque inicial buscaba simplificar el proceso de prototipado, permitiendo una evaluación temprana y eficiente del diseño general del sistema.

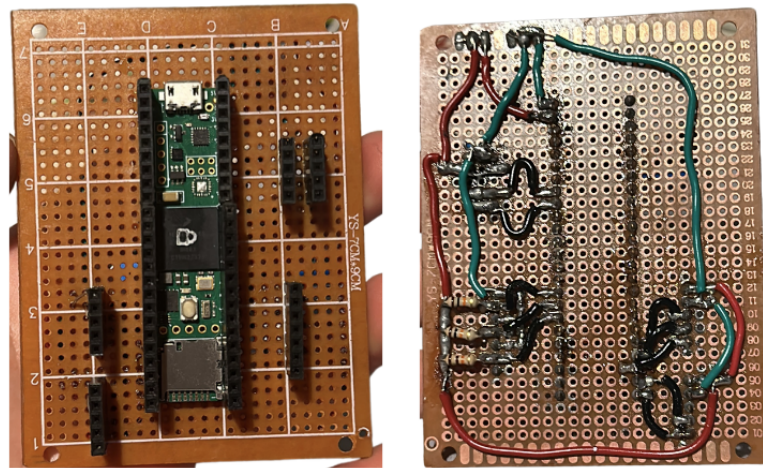


Figura 32: Placa perforada para el circuito electrónico

En las pruebas del prototipo con la placa perforada, los pulsadores mostraron comportamientos erráticos, registrando voltajes extraños sin estar presionados, en lugar de los esperados 0V y 5V. A pesar de los distintos intentos para diagnosticar la falla con herramientas como multímetros y osciloscopios, la conexión defectuosa no se identificó claramente. Esta inconsistencia llevó a la decisión de abandonar la placa perforada y optar por diseñar una PCB que sería más confiable y significaría recuperación del tiempo perdido.

6.5. Diseño de PCB

Para el diseño del PCB, se utilizó como referencia el diseño previo de la placa soldada, que contaba con una estructura bien organizada. El uso de headers hembra para las conexiones desmontables fue bastante útil, ya que facilitó el ensamblaje y permitió modificaciones rápidas y accesibles.

6.5.1. Esquemático en EasyEDA

El primer paso del diseño consistió en trasladar el esquemático inicial al software de EasyEDA. No se incluyó el Audio Board del Teensy debido a que este se monta directamente encima del microcontrolador y no necesitaba ocupar espacio en el layout de la placa. Los componentes utilizados en este diseño son:

- 2 headers hembra de 5 pines para los encoders
- 2 headers hembra de 4 pines para los dispositivos I2C

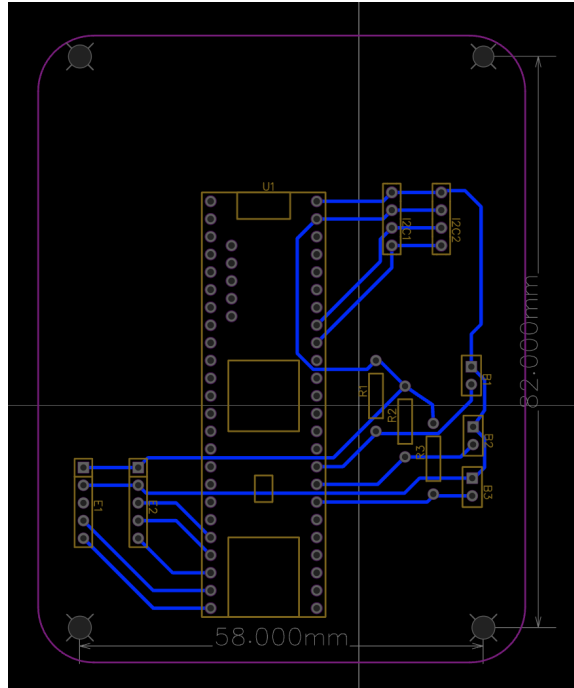


Figura 33: Diseño final del PCB

- 3 headers hembra de 2 pines para los botones
- 3 resistencias en pull-down para los botones
- footprint del Teensy 4.1

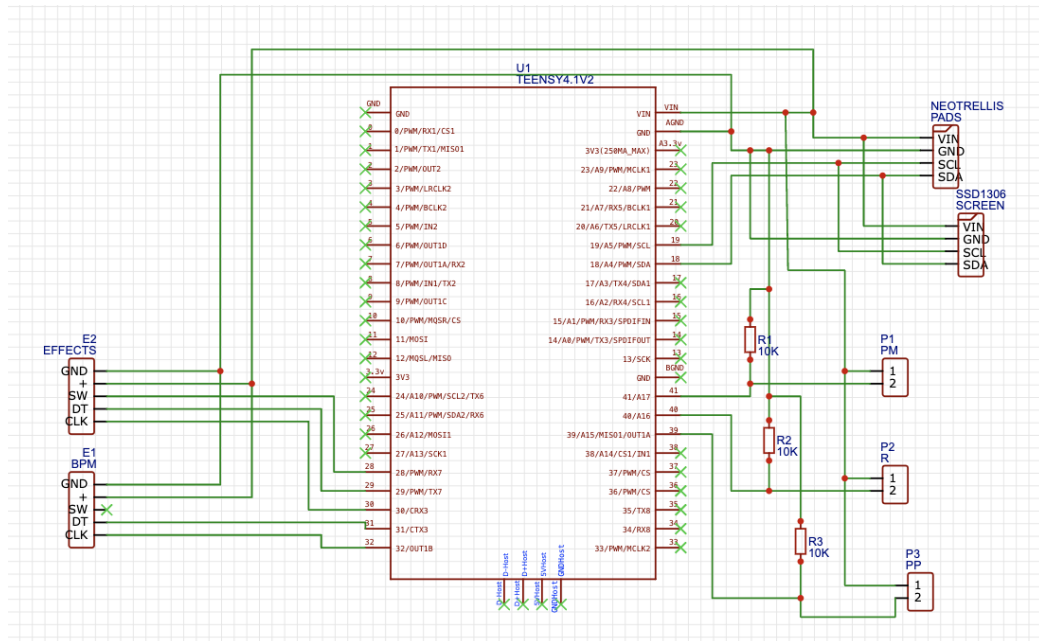


Figura 34: Esquemático para diseño de PCB

ANSI PCB TRACE WIDTH CALCULATOR							
Input Data			Results Data				
Field	Value	Units	Trace Data	Internal Traces		External Traces	
				Value	Units	Value	Units
Current (max. 35A)	422	mA	Required Trace Width	0.12	mm	0.05	mm
Temperature Rise (max. 100°C)	10	°C	Cross-section Area	12.9	mil ²	4.96	mil ²
Cu thickness	2	oz/ft ²	Resistance	0.06	Ω Ohms	0.15	Ω Ohms
Ambient Temperature	25	°C	Voltage Drop	0.02	Volts	0.06	Volts
Conductor Length	1	inches	Loss	0.01	Watts	0.03	Watts
Peak Voltage	5	Volts	Required Track Clearance	24	mil		

Figura 35: Calculadora de ancho de trazas ANSI[13]

Parámetro	mm
Ancho mínimo de pista	0.254
Ancho mínimo recomendado de pista	0.508
Espacio mínimo entre pistas	0.254
Ancho mínimo recomendado entre pistas	0.508
Tamaño mínimo de pad	Tamaño agujero + 0.508
Tamaño mínimo entre pads	0.254
Tamaño mínimo de pad para Vias	1.524
Tamaño recomendado para pad de resistores y capacitores	1.5748 y agujero de 0.9

Tabla 2: Reglas de diseño para la fabricación del PCB [30]

6.5.2. Parámetros y reglas de diseño

Para definir el tamaño de las pistas en el diseño del PCB, se utilizó la calculadora de ancho de trazas ANSI versión IPC-2221A [13]. Además, se tomaron en cuenta las reglas de diseño especificadas en el documento “*Especificaciones LPKF S103*” de Pablo Mazariegos [30].

El tamaño de las pistas se definió en 0.508 mm, a pesar de que la calculadora ANSI sugería un ancho de 0.12 mm como se observa en la Figura 35. Esto se debe a que, según las reglas de diseño, el ancho mínimo recomendado de pista es de 0.508 mm para asegurar el funcionamiento óptimo del circuito.

Se definió también el tamaño de pads de 1.5748mm con un agujero de 0.9mm para los headers hembra, los headers del Teensy y resistencias de la placa según lo establecido en las especificaciones.

6.5.3. Tamaño de placa

El tamaño de la placa de circuito impreso empleado fue de 7x9 cm, dimensiones que se basaron en el prototipo inicial realizado en la placa perforada.

6.5.4. Enrutamiento y diseño final

El enrutamiento del PCB se efectuó en una sola capa, específicamente en la capa inferior gracias a la simplicidad del circuito. Durante el proceso de enrutamiento, se aplicaron principios básicos de diseño de PCB para optimizar la disposición y minimizar posibles interferencias eléctricas.

6.5.5. Simulación del PCB

Haciendo uso de la herramienta de simulación 3D de EasyEDA, se generó una representación precisa del diseño final de la placa, como se muestra en la Figura 36. Esto fue útil para asegurar la ubicación adecuada de todos los componentes antes de proceder con la fabricación.

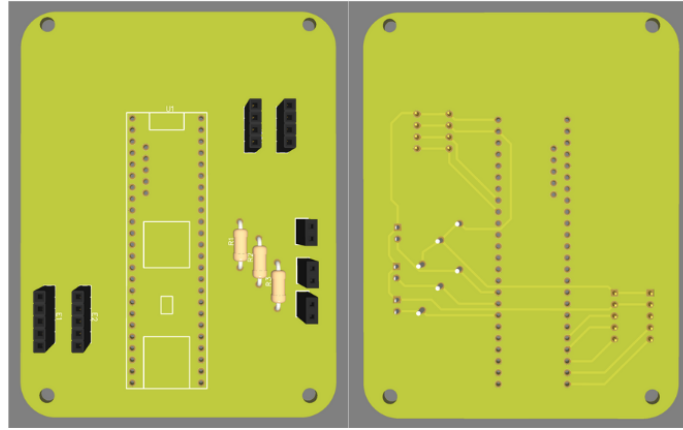


Figura 36: Simulación 3D del PCB

6.5.6. Fabricación del PCB

La fabricación del PCB, como se ve en la Figura 37 se llevó a cabo en el MakerLab de la Universidad del Valle de Guatemala, bajo la supervisión y ejecución del Ing. Pablo Mazariegos. Este paso crucial incluyó la generación y exportación de varios archivos necesarios para la producción, asegurando su adherencia a las normas de manufactura.

6.6. Diseño e impresión 3D

El proceso de diseño e impresión 3D fue clave para desarrollar la carcasa de la máquina de ritmos, facilitando la personalización y adaptación a las especificaciones técnicas requeridas. Utilizando OnShape para el diseño y una impresora 3D Prusa Mini+ para la fabricación, se convirtieron los conceptos iniciales en componentes físicos precisos. Este enfoque aseguró que cada parte del dispositivo fuera funcional, accesible y estéticamente agradable.

6.6.1. Diseño con OnShape

El diseño inicial del chasis en 3D para la máquina de ritmos se basó en un modelo gratuito descargado de Lightning Boxes [28]. Esta herramienta proporciona una estructura básica de caja y tapadera, con opciones para personalizar sus dimensiones y los agujeros necesarios para los insertos de rosca y tornillo. Asimismo, se incluyeron las especificaciones del PCB para montarla dentro de la caja.

El archivo STL generado se importó a OnShape para adecuar la caja a las necesidades específicas de la máquina de ritmos. Este proceso implicó la medición de los componentes que constituyen la interfaz de usuario, incluyendo los botones, encoders, el jack de audio y el puerto Micro USB hembra utilizando un vernier digital.

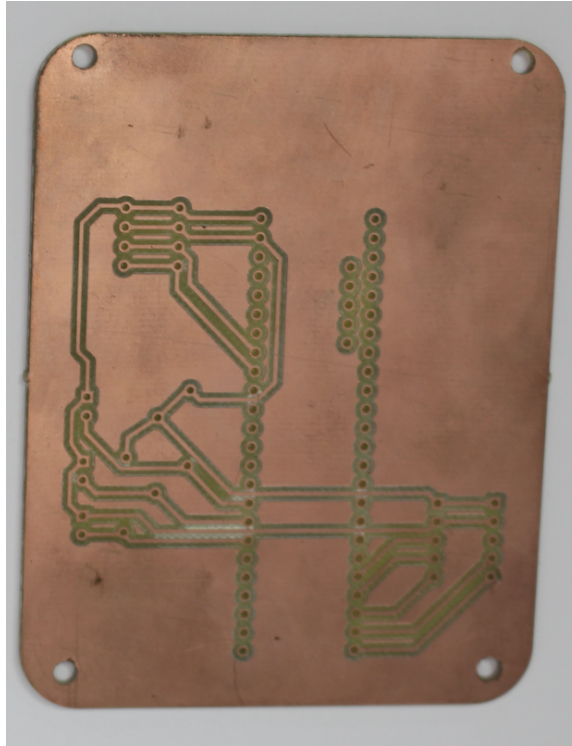


Figura 37: PCB impreso para la máquina de ritmos

Utilizando OnShape, se dibujaron figuras geométricas en la ubicación precisa de cada componente sobre el modelo sólido. Estas figuras fueron luego extruidas para crear los agujeros y cavidades necesarios en la caja. Con las medidas exactas, se realizaron los ajustes necesarios en la ubicación de los agujeros basándose en el esbozo inicial.

En el diseño final se modificó el posicionamiento de los botones, que inicialmente estaban al lado del secuenciador, para que quedaran arriba del mismo, entre los encoders y debajo de la pantalla. Adicionalmente, se trasladó la salida de audio y el puerto Micro USB a la parte frontal de la caja, en lugar de en la tapadera, mejorando así la accesibilidad y la funcionalidad del dispositivo. Este diseño puede ser referenciado en las Figuras 39, 40, 41 y 42

6.6.2. Selección del material

Para la fabricación de la carcasa, se seleccionó el PLA por sus propiedades biodegradables, su bajo costo y por ofrecer buenos resultados de impresión. Este material es ideal para estos proyectos y prototipos no industriales, ya que su baja contracción térmica minimiza las deformaciones y reduce la emisión de olores, haciéndolo adecuado para entornos cerrados.

6.6.3. Proceso de impresión 3D con Prusa MINI+

El diseño finalizado se exportó desde OnShape en formato STL, compatible con la mayoría de los programas de slicing. Este archivo fue procesado utilizando PrusaSlicer, configurado específicamente para la impresora Prusa MINI+. PrusaSlicer permite ajustar parámetros críticos para optimizar la calidad y eficiencia del proceso de impresión.

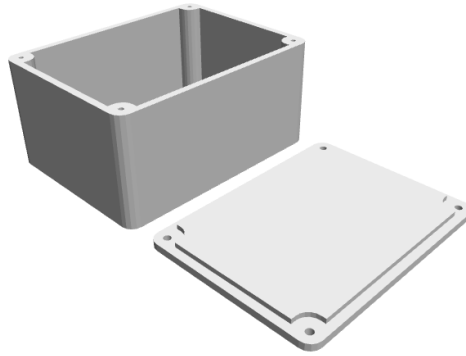


Figura 38: Vista isométrica de la caja básica [28]

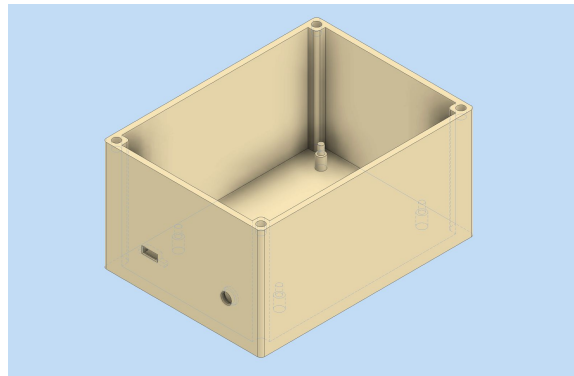


Figura 39: Vista isométrica del diseño final de la caja 1

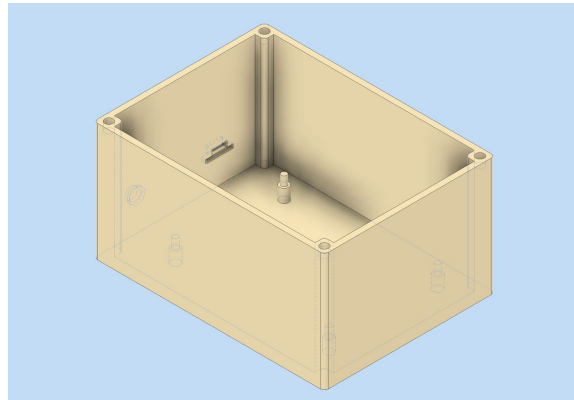


Figura 40: Vista isométrica del diseño final de la caja 2

Para la impresión, se utilizó la Prusa MINI+ y utilizando una altura de capa de 0.2 mm. Esto se hizo con el fin de encontrar un equilibrio entre resolución y velocidad de impresión, que asegura una definición adecuada sin prolongar innecesariamente el tiempo de impresión. El software descompone el modelo 3D en capas y genera un código G, que contiene instrucciones que utiliza la impresora para construir el modelo capa por capa.

Adicionalmente, se diseñaron soportes para la pantalla y el Trellis, y se imprimieron accesorios pre-diseñados para los encoders [14] y botones buscando darle una vista más cohesiva a la máquina

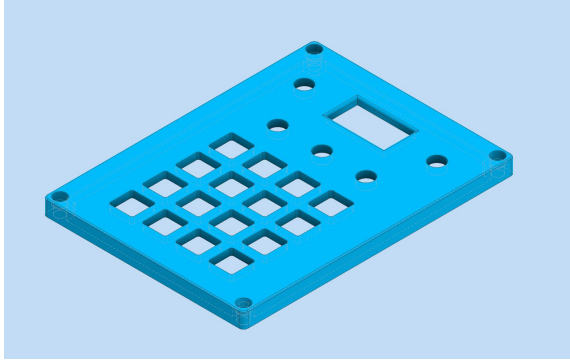


Figura 41: Vista superior del diseño final de tapadera

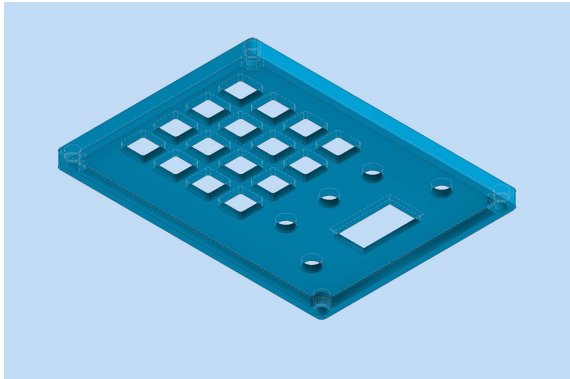


Figura 42: Vista inferior del diseño final de tapadera

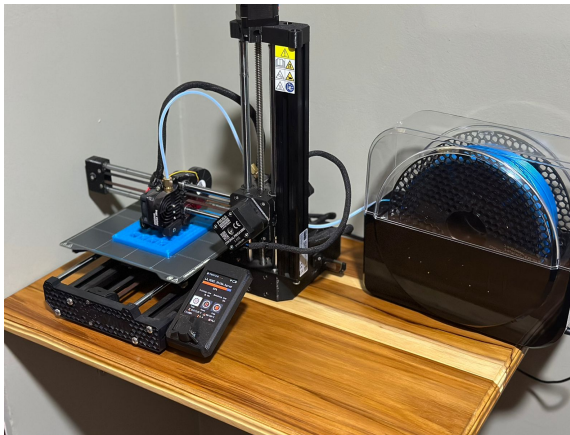


Figura 43: Prusa MINI+ en proceso de impresión de la tapadera para la caja

de ritmos.

6.7. Ensamblaje

El proceso de ensamblaje de la máquina de ritmos se llevó a cabo en varias etapas clave, documentando cuidadosamente cada paso para garantizar la precisión y replicabilidad del montaje.

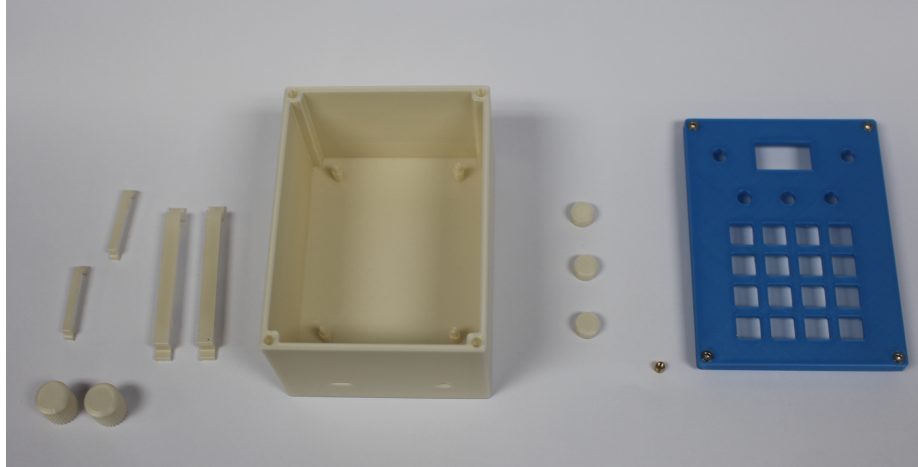


Figura 44: Piezas de la máquina de ritmos impresas en 3D

6.7.1. Preparación de componentes

Inicialmente, se prepararon los componentes principales para su integración. Esto incluyó la soldadura de headers hembra tanto en el Teensy como en el AudioBoard Rev D para facilitar su montaje en la configuración "stacked", como se muestra en la Figura 45.

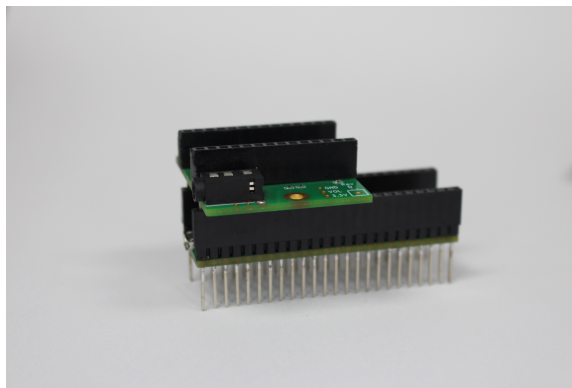


Figura 45: Teensy 4.1 y AudioBoard Rev D en configuración "stacked" con headers hembra

6.7.2. Incorporación del PCB

Posteriormente, se procedió a soldar headers hembra en el PCB, lo que permite una conexión segura y estable de los diversos componentes electrónicos. Esta etapa también incluyó la soldadura de cables para los botones, encoders y otros elementos de la interfaz de usuario, utilizando un código de colores para simplificar la instalación y futuras labores de mantenimiento. La Figura 46 muestra el PCB preparado con headers, y la Figura 47 muestra los componentes con sus cables soldados.

6.7.3. Montaje de la tapadera

Todos los componentes de la interfaz de usuario se colocaron en la tapadera, integrando soportes para la pantalla y el Trellis, como se muestra en la Figura 48.

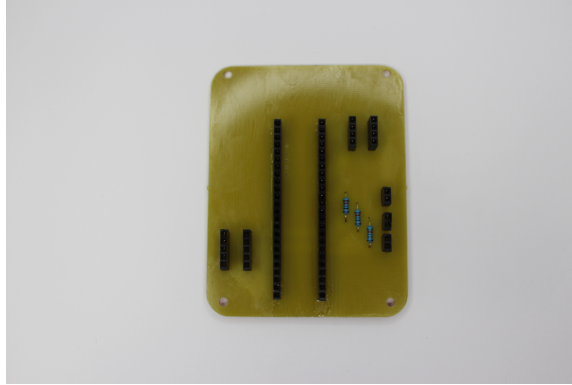


Figura 46: PCB con headers

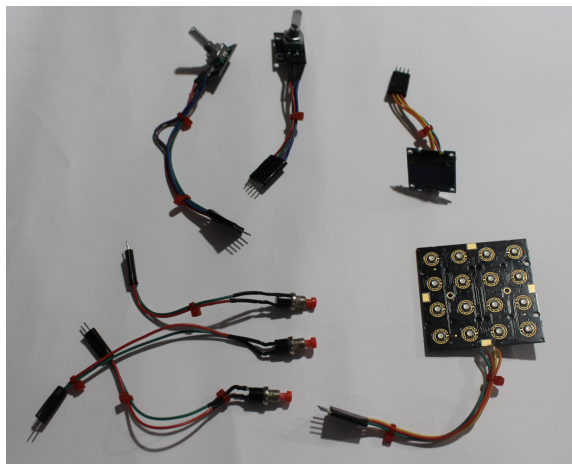


Figura 47: Componentes de la interfaz de usuario con sus cables soldados

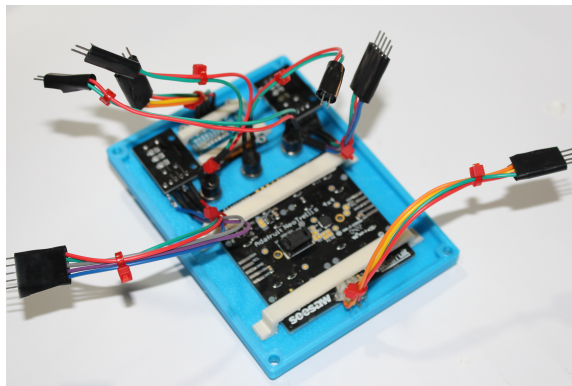


Figura 48: Instalación de componentes en la tapadera

6.7.4. Instalación final

Se instalaron los insertos de rosca en los agujeros predefinidos de la caja utilizando un cautín para calentarlos y que se deslizaran cuidadosamente. Tras asegurar el PCB dentro de la caja, como se visualiza en la Figura 49, se conectaron todos los cables de los componentes a sus respectivos headers.



Figura 49: Caja con PCB y roscas para tornillos

Finalmente, se cerró la caja con tornillos en las esquinas y se instalaron los accesorios de los encoders y botones. La Figura 50 muestra la máquina de ritmos completamente ensamblada, destacando la finalización exitosa del proceso de ensamblaje.



Figura 50: Máquina de ritmos ensamblada

6.8. OR-1: Open Source Educational Kit 2024

La OR-1 (Open Rhythm Versión 1) es una máquina de ritmos diseñada principalmente con fines educativos, combinando aspectos de ingeniería electrónica, de audio y mecánica para fomentar el desarrollo de la tecnología musical en la Universidad del Valle de Guatemala. Desarrollada en modalidad Open Source, permite a los usuarios explorar y aprender los pasos necesarios para construir un instrumento musical electrónico.



OPEN-SOURCE EDUCATIONAL KIT
2024

Figura 51: Isologo de la OR-1

El proyecto pretende ser un puente entre la creatividad y la tecnología para los estudiantes de la Licenciatura en Composición y Producción Musical de la Universidad del Valle de Guatemala. Esto se logra mediante la construcción de la OR-1, utilizando una guía detallada de ensamblaje. Durante esta actividad, los estudiantes analizan el circuito esquemático, el diseño del PCB y el modelo 3D existentes. También aprenden sobre microcontroladores y la programación de filtros y efectos en el entorno amigable del Arduino IDE. Además, los estudiantes desarrollan habilidades técnicas al aprender sobre la soldadura y el ensamblaje de las piezas para crear su propio instrumento musical. Esto les permite explorar disciplinas técnicas que, aunque presentes en su entorno educativo, no suelen ser abordadas a profundidad debido a la naturaleza artística de su carrera.

7.1. Diseño y desarrollo del circuito electrónico

El desarrollo del circuito electrónico consistió en determinar qué pines del microcontrolador iban a usarse para el hardware de la máquina de ritmos. Se realizó el diseño esquemático del circuito, el cual se intentó trasladar a una placa perforada, como se menciona en la sección 6.4.3.

La placa perforada no funcionó de la manera deseada, ya que al alimentar el circuito, se presentaron anomalías en los voltajes de los botones pulsadores. Luego de un análisis exhaustivo de medición de continuidad y análisis con un osciloscopio, no se determinó la fuente de este error y se optó por diseñar el circuito para su impresión en PCB.

El circuito en PCB impreso en una cara y con sus respectivos headers soldados mostró ser fiel al diseño que se simuló en EasyEDA y no se tuvo problemas con su funcionalidad.

Los archivos para impresión del PCB se encuentran en el GitHub del proyecto en el Anexo A.

7.2. Programación del software de la máquina

Se desarrolló un código fuente modular basado en el microcontrolador Teensy 4.1 y su Audio Board Rev D en el IDE de Arduino. Se implementó un método de documentación y versionados, lo que permitió un desarrollo más estructurado y ordenado. Este código está debidamente comentado para su fácil comprensión y no presentó errores de compilación.

El archivo OR-1.ino se encuentra en el GitHub del proyecto en el Anexo A.

7.3. Resultados con la máquina de ritmos

Para comprobar el funcionamiento de la máquina de ritmos, se programó una secuencia percusiva utilizando los 16 pads del secuenciador y 4 sonidos diferentes. Se cambió el tempo a 172bpm, y se grabaron diferentes versiones de la secuencia utilizando la salida de audio USB en la versión 10.6.2 de Logic Pro X en un sistema operativo Mac OS.

Luego de hacer grabaciones haciendo variaciones en volumen, usando el filtro pasa altas y aplicando el efecto granular, se exportaron los archivos WAV a una tasa de muestreo de 24 bits y se importaron en la versión 3.3.3 de Audacity, una herramienta Open Source valiosa para análisis de audio.

7.3.1. Pruebas de volumen

Se realizaron dos pruebas utilizando la herramienta Audacity para la comprobación del funcionamiento de control de volumen que va de 1 a 10, y cada una se detalla a continuación.

7.3.2. Análisis visual de formas de onda

La primera consistió en analizar las formas de onda de la secuencia percusiva original con el volumen 8 (el default al encender la máquina), 5 y 1, como se observan en la Figura 52. En el análisis visual se puede comprobar que el control de volumen si funciona, ya que las formas de onda con volumen 1 y volumen 8 muestran una diferencia significativa en la amplitud. A pesar de esto, las formas de onda con volumen 5 y 8 son muy similares.

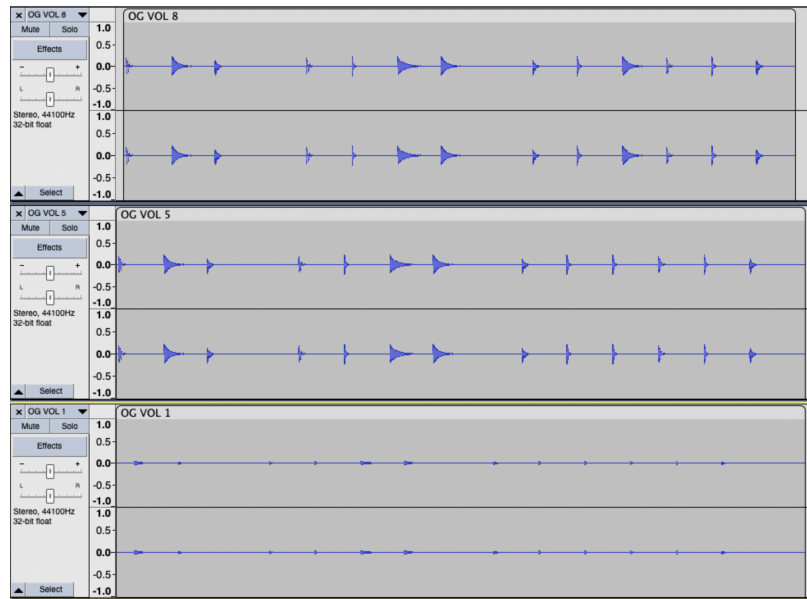


Figura 52: Comparación visual de formas de onda con volumen 8, 5 y 1, respectivamente

7.3.3. Análisis de valor RMS

Para conocer a detalle la diferencia de volumen entre las muestras, se realizó una prueba para obtener el valor RMS de cada una. El valor RMS (Root Mean Squared) es una técnica para conocer la potencia media de una señal de audio y puede utilizarse para interpretar la sonoridad que se percibe. En la Tabla 3 se detalla el valor obtenido para las grabaciones con volumen 8, 5 y 1. Estos resultados refuerzan que sí existe una variación de volumen, aunque podría ser significativo tomar más muestras con incrementos equidistantes para analizar la variación de esta de una forma más profunda.

	RMS (dB)
Vol 8	-31.89
Vol 5	-32.57
Vol 3	-46.91

Tabla 3: Valores RMS para análisis de control de volumen

7.3.4. Prueba de filtro pasa altas

Para probar la funcionalidad del filtro pasa altas, se grabó la misma secuencia percusiva aplicando 25 %, 50 % y 100 % del filtro y luego se obtuvo el gráfico de análisis espectral para cada una utilizando la Transformada Rápida de Fourier en Audacity.

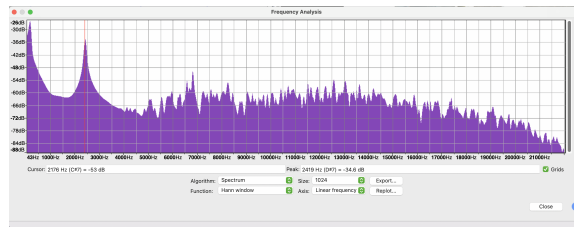


Figura 53: Análisis espectral de la secuencia limpia

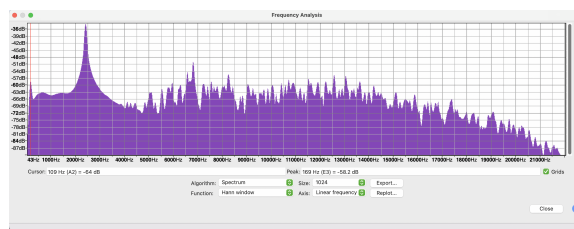


Figura 54: Análisis espectral de la secuencia con filtro pasa altas al 25 %

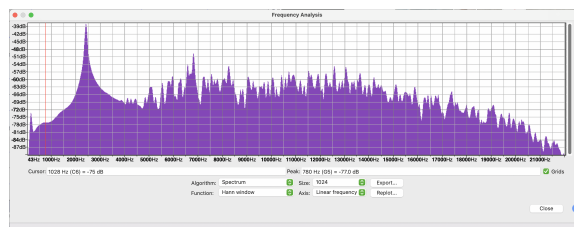


Figura 55: Análisis espectral de la secuencia con filtro pasa altas al 50 %

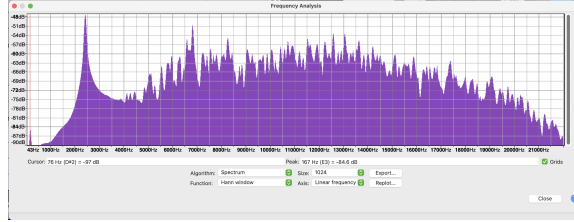


Figura 56: Análisis espectral de la secuencia con filtro pasa altas al 100 %

La figura del análisis espectral sin filtro pasa altas aplicado (Figura 53) sirve como referencia básica, mostrando una distribución uniforme de frecuencias. Con el filtro pasa altas al 25 % (Figura 54), se observa una atenuación parcial de las frecuencias bajas. Al aumentar el filtro al 50 % (Figura 55), la atenuación de las frecuencias bajas es más pronunciada, mientras que las frecuencias medias y altas permanecen claras. Finalmente, con el filtro al 100 % (Figura 56), las frecuencias bajas son casi completamente eliminadas, demostrando la efectividad del filtro pasa altas.

Tras el análisis realizado, se puede confirmar la correcta funcionalidad del filtro pasa altas de la máquina de ritmos. A medida que se incrementa el nivel del filtro pasa altas, las frecuencias bajas se atenúan progresivamente hasta ser casi eliminadas con el filtro al 100 %. A pesar de esto, a medida que las frecuencias bajas se atenúan, se puede observar que las frecuencias medias y altas tienen un leve aumento en la sonoridad. Esto no es el caso común con un filtro pasa altas, sin embargo, fue una decisión que se tomó al momento de programar el filtro, ya que debido a la naturaleza de los sonidos agudos utilizados en la máquina de ritmos, se solía perder la presencia percusiva.

7.3.5. Prueba de efecto granular

El efecto granular se implementó utilizando un parámetro fijo que agrega variaciones rítmicas leves y una textura de bit al sonido original con una configuración dry/wet. Para la prueba de este efecto, se analizaron las formas de onda para la secuencia limpia, la mezcla al 50 % y la mezcla completamente mojada.

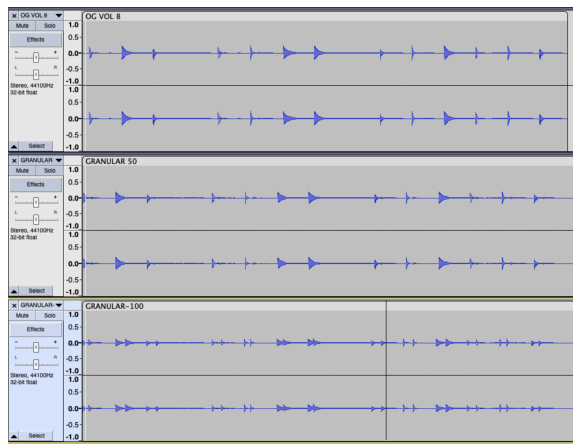


Figura 57: Formas de onda para secuencia completamente limpia, intermedio y completamente mojada con el efecto granular

Al observar las formas de onda de la Figura 57, se puede comprobar que el efecto añade texturas extras a la secuencia original. El efecto granular puede ser leve, pero cumple con su propósito al proporcionar un tipo de variación, común de las máquinas de ritmo clásicas.

7.4. Evaluación de interés de la OR-1 como recurso educativo

Se realizó una entrevista preliminar con el actual catedrático del curso Música Electrónica en la Universidad del Valle de Guatemala, el Ing. Christopher Berganza. Durante esta, se explicó el concepto de la OR-1 como un recurso educativo que buscaba funcionar como puente entre el arte y la tecnología para los estudiantes de la Licenciatura en Composición y Producción musical. Durante esta, el describió que sería de beneficio para los estudiantes y hay un espacio en la Unidad 4 del curso en el que se estudia la historia de las máquinas de ritmo, por lo cual sería aplicable adaptarlo.

Para obtener retroalimentación sobre la relevancia de un proyecto como la construcción de la OR-1 en el curso de Música Electrónica, se realizó una encuesta a los estudiantes de la Licenciatura en Composición y Producción Musical. Durante esta investigación, se obtuvieron los siguientes resultados:

- **Incorporación del proyecto práctico:**
 - El 75 % de los estudiantes encuestados cree que la inclusión de un proyecto práctico como la construcción de la máquina de ritmos OR-1 enriquecería su aprendizaje en el curso de Música electrónica.
 - El 20 % respondió “Posiblemente sí”.
 - El 5 % restante no estaba seguro de su respuesta.
- **Interés en proyectos prácticos de tecnología musical:**
 - El 55 % de los estudiantes expresó estar “Muy interesado” en participar en proyectos prácticos de tecnología musical como la construcción de la OR-1.
 - El 35 % indicó estar “Interesado”.
 - Un 10 % se mostró “Neutral”.
 - No hubo respuestas de “Poco interesado” o “Nada interesado”.
- **Motivación para participar activamente en el curso:**
 - El 80 % de los estudiantes afirmó que este tipo de proyectos los motivaría a participar más activamente en el curso.
 - El 15 % indicó que les motivaría “Algo”.
 - El 5 % señaló que “No mucho”.
- **Habilidades técnicas y creativas a desarrollar:**
 - El 75 % de los estudiantes espera desarrollar habilidades en “Programación y modificación de software”.
 - El 60 % mencionó “Soldadura y ensamblaje de componentes electrónicos”.
 - El 50 % espera adquirir conocimientos en “Diseño y modelado 3D”.
 - El 40 % mencionó “Análisis y mejora de circuitos”.
 - No hubo respuestas de “Ninguna de las anteriores”.
- **suficiencia de recursos disponibles:**
 - El 25 % de los estudiantes considera que los recursos actuales (herramientas, tiempo de clase, apoyo técnico) son “Totalmente suficientes”.
 - El 50 % cree que son “Suficientes, pero podrían mejorarse”.
 - El 20 % indicó que son “Insuficientes, necesitamos más recursos”.

- Un 5 % señaló que son “Totalmente insuficientes”.
- **Evaluación de la participación en el proyecto OR-1:**
 - El 85 % de los estudiantes prefiere ser evaluado “A través de pruebas prácticas del dispositivo construido”.
 - El 35 % indicó que prefiere una “Evaluación continua del proceso de construcción”.
 - El 30 % optó por “Presentaciones o informes del proyecto”.

Las habilidades técnicas y creativas que los estudiantes esperan desarrollar, junto con la retroalimentación sobre la suficiencia de los recursos disponibles, sugieren que el proyecto OR-1 tiene un gran potencial educativo. En conclusión, la construcción de la OR-1 es una propuesta viable dentro del curso y el contexto de la Universidad del Valle de Guatemala, con el potencial de enriquecer significativamente la experiencia de aprendizaje de los estudiantes en el campo de la tecnología musical y la música electrónica.

7.5. Elaboración de la guía de construcción

Se elaboró una guía de construcción que se encuentra en el Anexo C y en el repositorio de GitHub del proyecto en el Anexo A. Esta incluye la detallada documentación del proceso de ensamblaje de la máquina, así como introducciones al diseño de circuito y diseño mecánico de la carcasa. Además se explica acerca del proceso de impresión de PCBs y modelos 3D.

Para crear una guía que podía ser utilizada como un recurso educativo, se realizó el branding de la máquina OR-1. Esto incluyó el diseño de un isologo y se definió una paleta de colores acorde a la finalidad del proyecto.



Figura 58: Portada y contraportada de la guía de construcción de la OR-1

En este proyecto se desarrolló el software y hardware para una máquina de ritmos, además de una guía detallada para su construcción. El conjunto de estos recursos se publica como un proyecto Open Source para su posible replicación y modificación en un entorno educativo como lo es el curso de Música Electrónica en la Universidad del Valle de Guatemala.

Para este proyecto, se hizo uso del microprocesador Teensy 4.1 y su complemento, el AudioBoard Rev D para la programación del software en el Arduino IDE y se utilizaron las herramientas en línea EasyEDA y OnShape para el diseño del circuito impreso y el modelado 3D del chasis de la máquina, respectivamente.

La máquina de ritmos cuenta con una interfaz de usuario que incluye 16 pads de batería, perillas para ajustar el BPM, el volumen, un filtro pasa altas y un efecto de distorsión granular, además de botones para alternar entre modos de funcionamiento y una pantalla de visualización. Utiliza sonidos digitales en formato WAV que se almacenan en una micro SD integrada directamente en el AudioBoard. Cuenta también con dos posibles salidas de audio: por un jack de audífonos de 3.5mm y por medio de USB. El puerto USB de salida de audio permite grabar el sonido proveniente de la máquina de ritmos en alta definición directamente a un DAW (Digital Audio Workstation), y funciona también como alimentación y puerto de reprogramación para el microcontrolador.

La OR-1, aparte de ser una herramienta de producción musical, actúa como un puente educativo para estudiantes de música, donde se explora la intersección entre tecnología y arte. Aunque la guía se centra principalmente en el ensamblaje de la máquina, a través de este los estudiantes analizan el circuito esquemático, el diseño de PCB y el modelo 3D preexistentes y adquieren habilidades prácticas al soldar los componentes y conectar cables. También se familiarizan con el Arduino IDE para personalizar el software del instrumento, agregando efectos y funcionalidades. Este enfoque práctico tiende a enriquecer la comprensión técnica de los instrumentos electrónicos.

Con el fin de obtener retroalimentación sobre la relevancia de un proyecto como la construcción de una OR-1 en el curso de Música electrónica, se realizó una encuesta a los estudiantes de la carrera Licenciatura en Composición y Producción Musical, así como una entrevista al catedrático que imparte la misma. Se concluyó a través de estas que la construcción de la OR-1 es una propuesta viable dentro del curso y el contexto de la Universidad del Valle de Guatemala.

Recomendaciones

- Se recomienda explorar el uso de cables jumper AWG 20 en lugar de los AWG 22, ya que estos suelen quebrarse con facilidad al ensamblar los componentes de la interfaz de usuario.
- Se recomienda hacer pruebas de análisis de las funcionalidades de la máquina de ritmos utilizando su salida de audio análoga para comparar las diferencias con la salida USB.
- Se recomienda la exploración de las distintas funciones que ofrece el Audio Board de Teensy para la implementación de nuevas características para la máquina de ritmos.
- Se recomienda mejorar la interfaz visual del proyecto, incluyendo gráficos más avanzados y llamativos.
- Se recomienda la creación de sonidos propios y su conversión necesaria para el uso de la OR-1 como herramienta de producción musical.

CAPÍTULO 10

Bibliografía

Bibliografía

- [1] Al-Hassan, Ahmad Y. and Donald R. Hill: *Islamic Technology: An Illustrated History*. Cambridge University Press, 1986.
- [2] Amorim, A. and J. Kjellberg: *A step out of the grid-interaction with touch-based alternative rhythm programming layouts in drum machine user interfaces*. Master's thesis, Chalmers University of Technology, 2020. Recuperado el 13 de febrero de 2024 de <https://odr.chalmers.se/bitstream/20.500.12380/302146/1/CSE20-126%20Amorim%20Kjellberg.pdf>.
- [3] Arduino: *Arduino audio library*. <https://www.arduino.cc/reference/en/libraries/audio/>. Recuperado el 11 de febrero de 2024.
- [4] Arduino: *Libraries*. <https://www.arduino.cc/reference/en/libraries/>, s.f.
- [5] Avendaño, Gary: *Programación para Audio*. Clase impartida en la Universidad del Valle de Guatemala, 2023.
- [6] Berner, Anton: *The history of the drum machine: How music became digital*. <https://www.soundtrap.com/es/content/blog/history-of-drum-machine>, 2023. Recuperado el 4 de febrero de 2024.
- [7] Boehm, C.: *Music technology in higher education*. Probing the Boundaries of Higher Education, 12(1):85–90, 2005. Recuperado el 13 de febrero de 2024 de https://www.researchgate.net/profile/Frank-Mcmahon/publication/238729980_Probing_the_Boundaries_of_Higher_Education/links/54db7f3c0cf261ce15d03347/Probing-the-Boundaries-of-Higher-Education.pdf#page=96.
- [8] Brend, Mark: *The Sound of Tomorrow: How Electronic Music Was Smuggled Into the Mainstream*. Bloomsbury Publishing, 2012.
- [9] Brett, T.: *The Creative Electronic Music Producer*. Routledge, 2021. Recuperado el 13 de febrero de 2024 de <https://books.google.com/books?hl=en&lr=&id=hzMtEAAAQBAJ&oi=fnd&pg=PT8>.
- [10] Components 101: *Ky-040 - rotary encoder module*. <https://components101.com/modules/KY-04-rotary-encoder-pinout-features-datasheet-working-application-alternative>, 2021.
- [11] Corporation, Roland: *Roland tr-909 software rhythm composer*. https://www.roland.com/es-es/products/rc_tr-909/, s.f. Recuperado el 3 de febrero de 2024.
- [12] Crute, Adam: *The history of drum machines*. <https://musictech.com/guides/essential-guide/drum-machines-history/>, 2019. Recuperado el 28 de agosto de 2019.

- [13] Desmith, Nick: *ANSI IPC-2221A PCB Trace Width Calculator*. <https://nick.desmith.net/Electronics/TraceWidth.html>, 2023. Recuperado el 10 de abril de 2024.
- [14] Dotter, Cody: *KY-040 Rotary Encoder Knurled Knob*. <https://www.thingiverse.com/thing:4979991>, 2023. Recuperado el 10 de abril de 2024.
- [15] draw.io: *draw.io - Online Diagramming Tool*. <https://www.draw.io>, 2023. Recuperado el 14 de abril de 2024.
- [16] drumkito: *Roland TR-808 Sample Pack*. <https://www.drumkito.com/sample-packs/roland-tr-808-sample-pack/>, s.f. Recuperado el 10 de marzo de 2024.
- [17] Electronic Music, 120 Years of: *The Wurlitzer 'Side Man' Rudolph Wurlitzer Company, USA, 1959*. <https://120years.net/the-side-manwurlitzerusa1959/>, s.f. Recuperado el 8 de marzo de 2024.
- [18] ElectronicsReference: *Capacitor charge, discharge and time constant calculator*. https://electronicsreference.com/calculators/capacitor_charge_calculator/, s.f.
- [19] Glinsky, Albert: *Theremin: Ether Music and Espionage*. University of Illinois Press, 2000.
- [20] HyperPhysics: *Wave relations*. <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbasees/wavrel.html>, s.f.
- [21] Impresoras3D: *La Guía Definitiva sobre los Distintos Filamentos para Impresoras 3D*. <https://www.impresoras3d.com/la-guia-definitiva-sobre-los-distintos-filamentos-para-impresoras-3d/>. Recuperado el 11 de marzo de 2024.
- [22] Ispache, Cristopher Darwin Berganza: *Discusión sobre el curso de Música Electrónica UVG*. Entrevista Personal. Conducida por Andréé Fuentes, 12 de Marzo de 2024.
- [23] Jalilinia, Kamran: *Analog to digital conversion part 1*. <https://www.electronics-lab.com/article/analog-to-digital-conversion-part-1/>, 2023.
- [24] Kodichath, Sreedev: *Digital Audio 101: Playing Audio from a Microcontroller*. Tarka Labs, April 2021. Recuperado el 8 de marzo de 2024 de <https://blog.tarkalabs.com/digital-audio-101-playing-audio-from-a-microcontroller-5df1463616c>.
- [25] Kwak, Matthijs: *Rhythmicon*. <https://patchstorage.com/rhythmicon/>, 2022.
- [26] Lady Ada: *Adafruit neotrellis*. <https://learn.adafruit.com/adafruit-neotrellis/overview>, 2024.
- [27] Lehrman, Paul: *Teaching Electronic Musical Instrument Design*. Synth and Software, 2020. Recuperado el 8 de marzo de 2024 de <https://synthandsoftware.com/2020/07/teaching-electronic-musical-instrument-design/>.
- [28] LightningBoxes: *Basic Box*. <https://lightningboxes.com/product/basic-box/>, 2023. Recuperado el 10 de abril de 2024.
- [29] MANUFACTUR3D: *3d printing technology choice: Fdm v/s sla v/s sls*. <https://manufactur3dmag.com/3d-printing-technology-choice-fdm-v-s-sla-v-s-sls/>, 2018.
- [30] Mazariegos, Pablo: *Especificaciones técnicas del servicio de fresado de circuitos*. <https://sites.google.com/uvg.edu.gt/makerlabuvg/p%C3%A1gina-principal>, 2022.
- [31] Medina, Isaac: *And The Beat Goes on: The Story of the Drum Machine*. Tesis de Licenciatura, California State University, Monterey Bay, 2017. Recuperado el 13 de febrero de 2024 de https://digitalcommons.csumb.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1098&context=caps_thes_all.

- [32] Music, Berklee College of: *Electronic Production and Design (EPD)*, s.f. Recuperado el 8 de marzo de 2024 de <https://college.berklee.edu/epd>.
- [33] MusicTech: *Try Roland's VST/AU versions of the 808/909 in your DAW for free*. <https://120years.net/the-side-manwurlitzerusa1959/>, 2018. Recuperado el 8 de marzo de 2024.
- [34] Mínguez Fernández, Alejandro: *Desarrollo de una caja de ritmos empleando Axoloti*. Tesis de Licenciatura, Universidad Politécnica de Madrid, 2020. Recuperado el 13 de febrero de 2024 de <https://oa.upm.es/70476/>.
- [35] NYU: *Master of Music in Music Technology*. Masters, s.f. Recuperado el 8 de marzo de 2024 de <https://steinhardt.nyu.edu/programs/music-technology/graduate-programs/master-music-technology>.
- [36] Ooberpad: *What is sampling rate, sample depth, and audio sampling in audio?* <https://www.ooberpad.com/blogs/audio-video-tips/what-is-sampling-rate-sample-depth-and-audio-sampling-in-audio>, 2022.
- [37] PJRC: *Teensy 4.1 technical specifications*, 2024. Recuperado el 6 de mayo de 2024 de: <https://www.pjrc.com/store/teensy41.html>.
- [38] Pohlmann, Ken C.: *Principles of Digital Audio*. McGraw-Hill Education, 6th edición, 2010, ISBN 978-0071663465. Referencia esencial para entender la digitalización del audio, las técnicas de muestreo y aplicaciones en tecnologías de la información.
- [39] ProtoSupplies: *Teensy 4 audio stacks*. <https://protosupplies.com/product/teensy-4-audio-stack/>, s.f.
- [40] Ramu, Kurinjimalar, M. Ramachandran y M .A. Jeba Selvam: *Microcontroller Based Sensor Interface and Its Investigation*. Journal of Embedded Systems, 2022. <https://typeset.io/papers/microcontroller-based-sensor-interface-and-its-investigation-2bkjscit>, Recuperado el 11 de febrero de 2024.
- [41] Raspberry Pi: *Raspberry pi pico*. <https://www.raspberrypi.com/products/raspberry-pi-pico/>, s.f.
- [42] Roland Corporation: *Roland TR-808 Service Manual*, 1982. https://archive.org/details/roland_Roland_TR-808_Service_Manual/mode/2up, Recuperado el 15 de abril de 2024.
- [43] Roland Corporation: *Roland TR-909 Service Manual*, 1984. <https://archive.org/details/manualzz-id-1060785>, Recuperado el 15 de abril de 2024.
- [44] Systems, Dassault: *Guía de Procesos de Impresión 3D*. <https://www.3ds.com/es/make/guide/process/3d-printing>. Recuperado el 3 de febrero de 2024.
- [45] The Hague, Royal Conservatory of: *Institute of Sonology*. Recuperado el 8 de marzo de 2024 de <https://www.koncon.nl/en/departments/sonology>.
- [46] Tonygo2: *Arduino and the ssd1306 oled i2c 128x64 display*. <https://www.instructables.com/Arduino-and-the-SSD1306-OLED-I2C-128x64-Display/>, 2011.
- [47] University, Stanford: *Center for Computer Research in Music and Acoustics (CCRMA)*. Recuperado el 8 de marzo de 2024 de <https://ccrma.stanford.edu/overview>.
- [48] Woodside, J.: *El sampleo: de la técnica al discurso sonoro y musical*. Revista iberoamericana de comunicación, 2008. Recuperado el 13 de febrero de 2024 de https://www.academia.edu/download/31332326/Woodside__Julian_-_El_sampleo._De_la_tecnica_al_discurso_sonoro_y_musical.pdf.

A. Repositorio de GitHub para la OR-1

Este repositorio de GitHub contiene los archivos para el código fuente, modelo 3D, diseño de PCB y la guía de construcción.

<https://github.com/andreefuentes/OR1>

B. Encuesta

C. Guia de construcción

En este Anexo se incluyen los contenidos de la guía de construcción, también disponible en formato digital en el GitHub del proyecto.



OPEN-SOURCE EDUCATIONAL KIT
2024

Evaluación de interés: construcción de una OR-1

Esta encuesta esta diseñada para evaluar el interés estudiantil en el proyecto de la construcción de una máquina de ritmos. Esta propuesta forma parte de la investigación de tesis para optar al grado de Licenciatura en Ingeniería en Tecnología de Audio de André Fuentes Noriega.

Durante la encuesta se explora la integración de un proyecto con enfoque multidisciplinario al curso de Música Electrónica impartido por el Ing. Christopher Berganza en la Universidad del Valle de Guatemala y está dirigida a los estudiantes de la Licenciatura en Composición y Producción musical. Este fusiona una introducción a conceptos como programación de microcontroladores, placas impresas, soldadura y diseño e impresión 3D a los ya establecidos en el curso de música electrónica, en el cual los estudiantes utilizan su creatividad para crear música utilizando instrumentos electrónicos.

El objetivo de la encuesta es recopilar las opiniones y expectativas de los estudiantes acerca del proyecto para determinar el interés y evaluar cómo este proyecto práctico podría complementar el aprendizaje durante el curso. Los resultados contribuirán significativamente a la investigación de tesis y a crear un precedente para una posible implementación del proyecto en el futuro.

[Sign in to Google](#) to save your progress. [Learn more](#)

Consentimiento informado

Antes de participar en esta encuesta, por favor lee el siguiente consentimiento informado:

Al continuar con esta encuesta, aceptas participar voluntariamente en este estudio de investigación educativa. Las respuestas que proporcionas serán utilizadas exclusivamente con fines académicos y de investigación para evaluar la viabilidad y el interés en el proyecto de construcción de la Máquina de Ritmos OR-1. Se garantiza la confidencialidad y el anonimato de todas las respuestas: no se recogerán datos personales que puedan identificarte directamente.

No hay riesgos conocidos asociados con tu participación en esta encuesta. La participación es completamente voluntaria y puedes decidir retirarte en cualquier momento sin ninguna consecuencia.

Al hacer clic en "Siguiente", confirmas que has leído y entendido este consentimiento informado y que aceptas participar en la encuesta bajo estos términos.

[Next](#)

[Clear form](#)

Figura 59: Consentimiento informado de la encuesta



OPEN-SOURCE EDUCATIONAL KIT
2024

Evaluación de interés: construcción de una OR-1

[Sign in to Google](#) to save your progress. [Learn more](#)

OR-1: Kit Educativo de Código Abierto

El OR-1 es un innovador kit educativo de código abierto diseñado para la construcción de una máquina de ritmos. Este proyecto ofrece a los estudiantes la oportunidad de adquirir experiencia práctica y conocimientos técnicos en diversas áreas, entre ellas:

- **Interacción con Componentes Electrónicos:** Manejo de botones, encoders y pantallas, familiarizándose con su funcionamiento y aplicaciones.
- **Análisis y Soldadura de Circuitos Electrónicos:** Los estudiantes aprenderán a identificar componentes en un esquema electrónico y realizarán la soldadura de una PCB (placa de circuito impreso).
- **Diseño y Fabricación 3D:** Análisis de los diseños 3D para la caja del instrumento y piezas complementarias como botones y perillas. Impresión de estos componentes para ensamblaje.
- **Programación y Desarrollo de Software:** Revisión del código fuente existente y desarrollo de nuevas funciones y capacidades para personalizar el instrumento.
- **Ensamblaje del Dispositivo:** Integración de todos los componentes electrónicos y mecánicos para completar la construcción de la máquina de ritmos.
- **Creación Musical:** Utilización del nuevo instrumento electrónico para componer música utilizando sus propios samples, explorando las posibilidades creativas que ofrece.

Para facilitar la construcción, los estudiantes contarán con un manual detallado de construcción. Sin embargo, se fomenta la investigación personal y la resolución creativa de problemas para abordar cualquier duda que pueda surgir durante el proceso.

Este proyecto no solo busca enseñar habilidades técnicas, sino también estimular la creatividad y el análisis crítico, preparando a los estudiantes para futuros desafíos en tecnología y diseño de sonido.

[Back](#)

[Next](#)

[Clear form](#)

This form was created inside of Universidad del Valle de Guatemala. [Report Abuse](#)

Google Forms

Figura 60: Explicación del proyecto en la encuesta

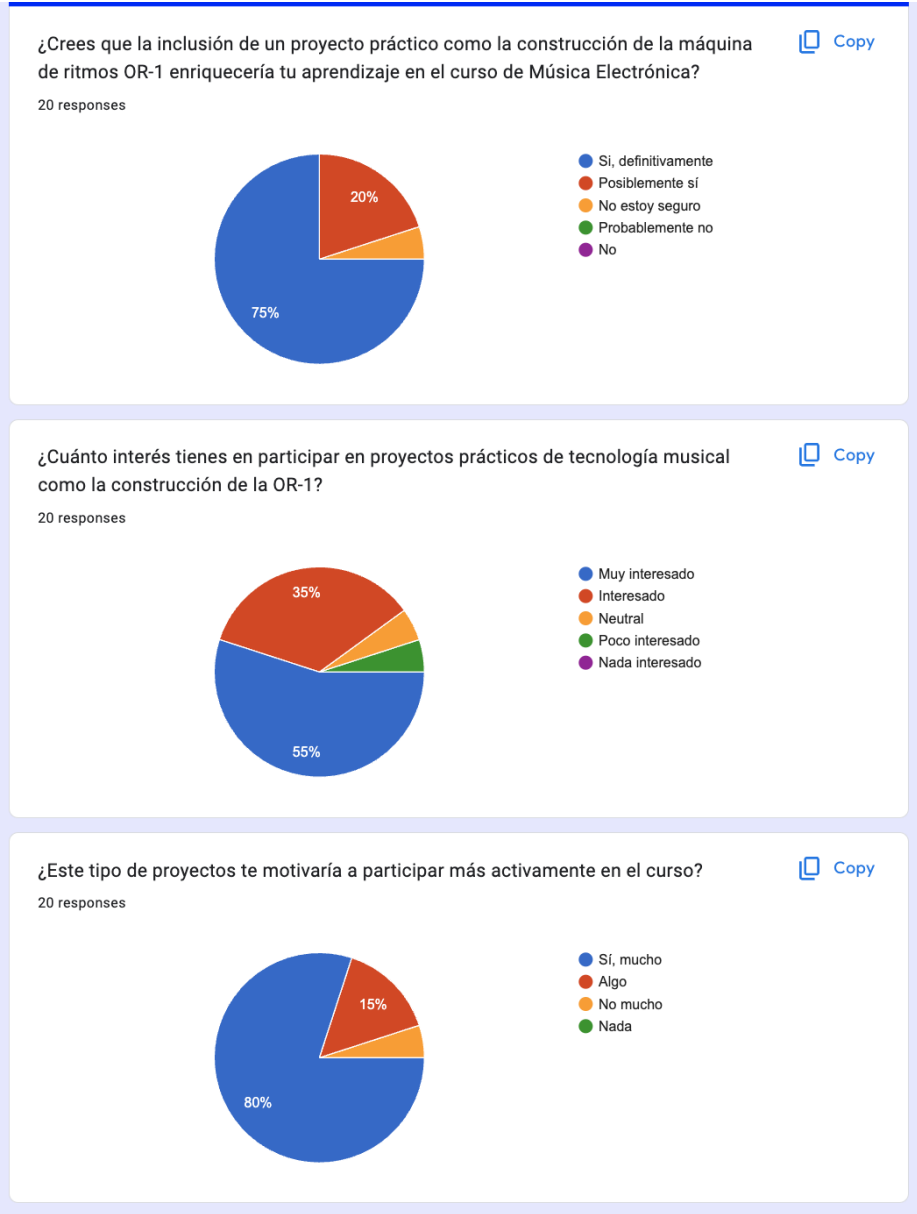


Figura 61: Resultados de la encuesta 1

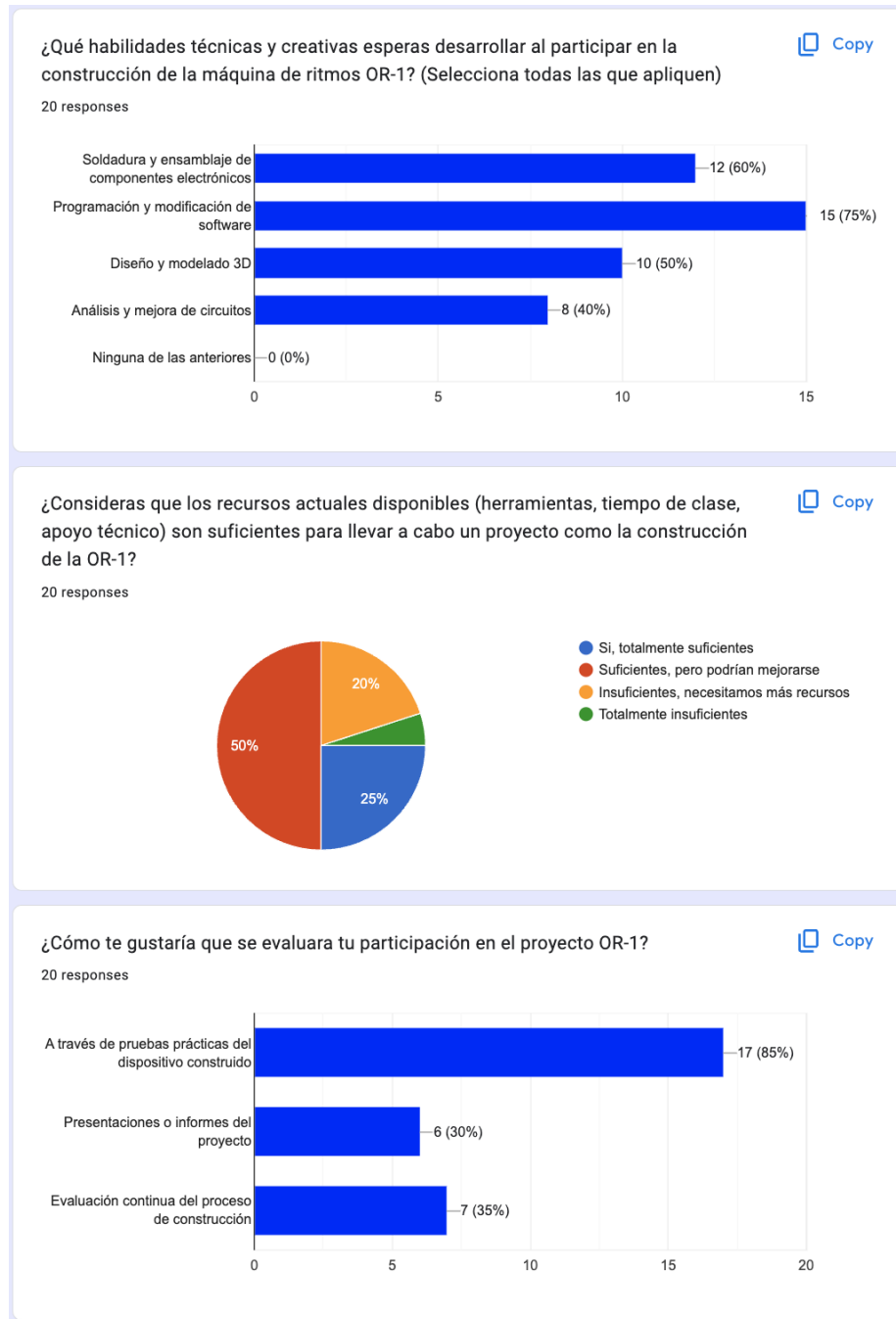


Figura 62: Resultados de la encuesta 2

Índice

1. Introducción	5
2. Listado de Componentes	6
3. Esquemático	12
4. Diseño e Impresión del PCB	14
5. Diseño e Impresión de la carcasa	16
6. Soldadura	19
7. Código Fuente	22
8. Ensamblaje	29
9. Prompts de ejercicios	32
10. GitHub	35



Figura 63: Página 3 de la guía de construcción

1 Introducción

Como amante de la música, la tecnología y la intersección entre ambas, decidí crear este manual con el propósito de que más personas puedan comprender qué conlleva la creación de un instrumento musical electrónico.

Tomando como referencia las icónicas *TR-808* y *TR-909* de la *Roland Corporation* en años 80, diseñé las distintas partes que componen una máquina de ritmos física, pero programada digitalmente. Este proyecto *Open Source* busca potenciar la creatividad e innovación de cualquier persona que acepte el reto, y evitar la total digitalización de este instrumento pionero de géneros tales como el EDM y el hip hop.

La OR-1 es una máquina de ritmos con un secuenciador de 16 pasos que permite cargar tus propios *samples* para programar patrones rítmicos. Cuenta con un filtro pasa altas, un efecto de distorsión y la capacidad manejar varios modos de operación, tales como *FreePlay/Programming* y *RepeatMode*. Incluye una interfaz de audio USB y monitoreo por audífonos, además de una pantalla para la visualización de los modos de funcionamiento.

Este manual te guiará paso a paso en el proceso de ensamblaje, soldadura y programación de tu dispositivo, para que puedas empezar a crear música con la OR-1.

Todos los archivos necesarios se encuentran en el GitHub del proyecto, anexo al final del manual.

Figura 64: Página 5 de la guía de construcción

2 Listado de Componentes

En esta sección, se detallan los componentes necesarios para la construcción de la OR-1 con una breve descripción de cada uno y su función en el proyecto. Esta sirve de referencia para poder asegurarte de tener todo listo antes de comenzar el ensamblaje.

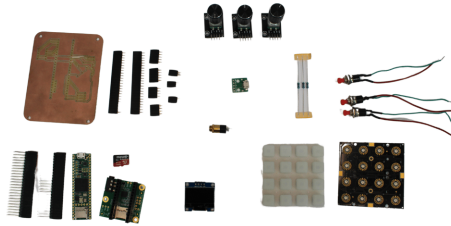


Figura 65: Página 6 de la guía de construcción



















1  1 x Teensy 4.1	2  1 x Audio Board Rev D	3  3 x resistencias 10K Ω
4  3 x botón de pulsador	5  2 x encoder KY-040	6  1 x Adafruit NeoTrellis 4x4
7  1 x Adafruit NeoTrellis Silicone Pad	8  1 x pantalla i2c 128x64	9  1 x jack 3.5mm stereo
10  1 x PCB micro USB hembra	11  2 x cable micro USB	12  2 x header hembra 24 pin corto
13  2 x header hembra 5 pin corto	14  2 x header hembra 4 pin corto	15  3 x header hembra 2 pin corto
16  4 x header hembra 24 pin largo	17  1 x kit de 60 cables dupont macho - macho	18  1 x tarjeta micro SD

Figura 66: Página 7 de la guía de construcción

1. Teensy 4.1

Es el microcontrolador y la parte más esencial de la OR-1. Cuenta con un procesador ARM Cortex-M7 a 600Mhz, 1 MB de RAM y 8 MB de memoria Flash. Está diseñado específicamente para aplicaciones de audio, proporcionando la potencia suficiente para procesamiento de señales digitales complejas. Se programan con el leguaje del Arduino IDE.

2. Audio Board Rev D

Es la tarjeta de expansión de audio para el Teensy 4.1. Este módulo incluye un códec de audio SGT15000 que proporciona entrada y salida estéreo de alta calidad. Facilita la adición de capacidades de procesamiento de audio como efectos, filtros y más.

3. Resistencias de 10K Ω

Resistencias utilizadas para la configuración de los botones. Estas aseguran que los pines de entrada de los botones se mantengan en un estado bajo cuando los botones no están siendo presionados, previniendo lecturas erróneas debido al ruido eléctrico que puede darse en una placa electrónica.

4. Botones de pulsador

Botones utilizados para las interacciones manuales de la OR-1. Este tipo de dispositivo permiten al usuario enviar señales de entrada al microcontrolador. En la máquina, controlan los modos: Repeat, Freeplay/Programming y Pausa/Play.

Figura 67: Página 8 de la guía de construcción

5. Encoder KY-040

Los encoders son dispositivos que miden la rotación y precisión angular, es decir, convierten el movimiento del knob en señales digitales que pueden ser interpretadas por el microcontrolador. Sus parámetros pueden ser guardados digitalmente y permiten el control preciso de parámetros como tempo, volumen, filtros y efectos.

6. Adafruit Neotrellis 4x4 con LEDs

Es una matriz de 16 botones que pueden ser iluminados por LEDs RGB. Se comunica con el microcontrolador a través del protocolo I2C. En la OR-1, es el secuenciador de 16 pasos que permite la programación de ritmos.

7. Adafruit NeoTrellis Silicone Pad

Es el pad de silicona para el NeoTrellis 4x4. Proporciona una superficie táctil suave y duradera para los botones del NeoTrellis, facilita y mejora la experiencia de usuario y aporta a la durabilidad del OR-1.

8. Pantalla I2C 128x64

Esta pantalla de visualización permite la visualización de los estados de la máquina en la interfaz de usuario. Se comunica por protocolo I2C con el microcontrolador. En ella, se muestra la información crucial como el modo de operación, BPM, y otros parámetros de la OR-1.

Figura 68: Página 9 de la guía de construcción

9. Jack 3.5mm stereo

Es un conector de salida de audio para audífonos o altavoces. Permite conectar la OR-1 a dispositivos de audio externos, utilizado como monitoreo personal con audífonos con reproducción de sonido en alta calidad.

10. PCB micro USB hembra

Esta placa con conector micro USB funciona como una extensión del puerto micro USB del Teensy 4.1 para poder ser accedido desde afuera de la OR-1 como fuente de alimentación o para su salida de audio USB (compatible con diferentes DAWs).

11. Cable micro USB

Estos cables de conexión para transferencia de datos y energía funcionan para conectar la OR-1 a una computadora o a una fuente de alimentación. Uno de los cables es utilizado dentro de la máquina para puentear entre el micro USB hembra del Teensy 4.1 y la placa hembra en el exterior de la máquina.

12. Header hembra 24 pin corto

Utilizado para soldarse en el PCB de la OR-1 para posteriormente montar el Teensy 4.1.

13. Header hembra 5 pin corto

Utilizado para soldarse en el PCB de la OR-1 para posteriormente montar los encoders.

Figura 69: Página 10 de la guía de construcción

14. Header hembra 4 pin corto

Utilizado para soldarse en el PCB de la OR-1 para posteriormente montar los dispositivos I2C.

15. Header hembra 2 pin corto

Utilizado para soldarse en el PCB de la OR-1 para posteriormente montar los botones.

16. Header hembra 24 pin largo

Utilizado para soldarse a los pines del Teensy 4.1 y Audio Board Rev D (14 pines). El Teensy 4 con pin largo va montado sobre el pin corto del PCB, y el Audio Board va montado sobre el Teensy.

17. Kit de 60 cables dupont macho - macho

Estos cables son flexibles y fáciles de utilizar. Serán utilizados para los componentes principales, buscando que se puedan montar y desmontar fácilmente de los headers hembra en el PCB de la OR-1.

18. Tarjeta micro SD

Es la memoria externa para el almacenamiento de los *samples* de la máquina de ritmos. Es introducida en el Audio Board Rev D.

Adicional recomendado: termoencogible para evitar la interconexión entre pines.

*Los headers suelen conseguirse como tiras largas, deben ser cortados para obtener el tamaño deseado.

Figura 70: Página 11 de la guía de construcción

3 Esquemático

Un esquemático es una representación gráfica que detalla las conexiones entre componentes electrónicos mediante símbolos estándar y líneas representativas. Este facilita la planificación del circuito, permitiendo identificar y corregir errores previos a y durante la construcción.

El esquemático de la OR-1, ya desarrollado, presenta un diseño centrado en el microcontrolador Teensy 4.1, encargado del procesamiento de audio y las operaciones generales. El Audio Board Rev D se monta directamente encima sin necesidad de cableado adicional, y se especifican los pines correctos para el mismo.

La comunicación para la pantalla y NeoTrellis con el Teensy se realiza mediante el protocolo I2C, que utiliza solo dos líneas: SDA para datos y SCL para sincronización. Para simplificar el esquemático y evitar confusión, no se dibujaron las líneas entre estos componentes pero se indica claramente su conexión a los pines SDA 18 y SCL 19 del Teensy. También se detalla la conexión de las resistencias, botones y encoders de manera clara.

Es importante analizar y comprender el esquemático para poder realizar todas las conexiones correctamente para evitar errores que puedan dañar los componentes o afectar el funcionamiento del dispositivo. Para esto, se añade un código de colores de fácil seguimiento.

Figura 71: Página 12 de la guía de construcción

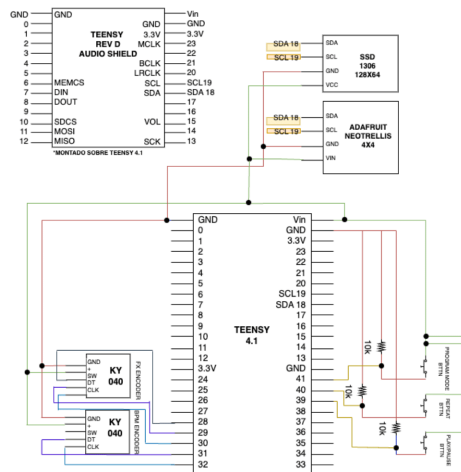


Figura 72: Página 13 de la guía de construcción

4 Diseño e impresión de la PCB

Una PCB o placa de circuito impresa por sus siglas en inglés, están compuestas de material aislante y pistas conductoras de cobre que logran interconectar diversos componentes electrónicos en una sola placa de metal. Este tipo de placas facilita la conexión entre componentes y optimiza el espacio para aplicaciones como lo es un instrumento musical electrónico.

Se diseñó la PCB de la OR-1 con la herramienta en línea EasyEDA y utilizando de referencia el esquemático de la sección anterior. Para poder conseguir un diseño modular de fácil montaje/desmontaje, se escogieron headers hembras para la conexión de los diversos componentes de la máquina a la placa. El diseño simulado se presenta en la siguiente imagen:

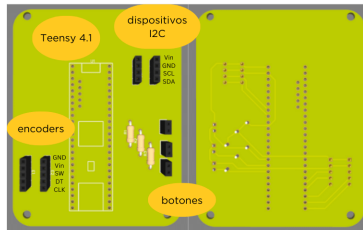


Figura 73: Página 14 de la guía de construcción

Puedes acudir al MakerLab de la Universidad del Valle de Guatemala para la impresión de tu PCB. En este laboratorio se cuenta con una máquina fresadora capaz de imprimir diseños en 2 capas. El diseño de PCB de la OR-1 cuenta con todos los requerimientos necesarios y ha sido aprobada por el encargado y supervisor del laboratorio, el Ingeniero Pablo Mazariegos.

Puedes acceder a los archivos Gerber (necesarios y listos para la impresión) directamente en el GitHub del proyecto. El resultado final es la PCB de la siguiente imagen:

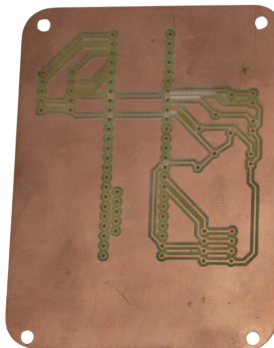


Figura 74: Página 15 de la guía de construcción

5 Diseño e impresión de la carcasa

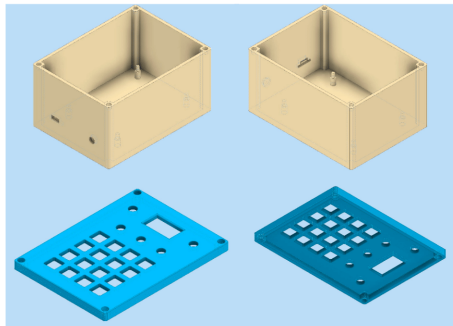
La carcasa es una parte esencial de la OR-1 que permite la contención de todos los componentes, escondiendo aquellos que no son parte de la interfaz de usuario y garantizando el fácil acceso a periféricos tales como las salidas de audio y puerto de alimentación.

El diseño de la carcasa de la OR-1 se realizó utilizando la herramienta en línea OnShape, basándose en un diseño de caja con tapadera proporcionado por la empresa Lightning Boxes. Se añadieron los agujeros pertinentes para colocar de manera efectiva los botones, encoders, pantalla y el NeoTrellis. También se colocaron agujeros para el jack de audio y micro USB hembra. Finalmente, se agregó un soporte para la PCB, asegurando que esta no se mueva durante el proceso de ensamblaje ni al transportar el dispositivo de un lugar a otro.

Finalmente, la caja cuenta con agujeros para poder añadir insertos que permiten cerrar la caja con tornillos.

Figura 75: Página 16 de la guía de construcción

El diseño final de la caja se puede observar desde distintos ángulos en las siguientes imágenes:



Todos los archivos STL del diseño pueden ser accedidos en el GitHub del proyecto. Puedes acudir al D-Hive en la Universidad del Valle de Guatemala para recibir una capacitación acerca de la impresión 3D y tener acceso a las impresoras para realizar tu proyecto.

Figura 76: Página 17 de la guía de construcción

El proceso de impresión requiere que descargues los archivos STL del proyecto y los transfieras a un programa slicer que utilice la impresora 3D disponible. Este lo aprenderás a utilizar durante la capacitación.

Se recomienda utilizar PLA, un material con propiedades biodegradables y de bajo costo y realizar la impresión a una altura de capa de 0.2mm, buscando el equilibrio entre resolución y velocidad de impresión.

Adicional a la caja, puedes descargar e imprimir accesorios para los encoders y botones, lo cual brinda cohesividad al diseño del instrumento. También debes imprimir los soportes para evitar que se mueva la pantalla y el NeoTrellis.

Las piezas finales impresas pueden observarse en la siguiente imagen:

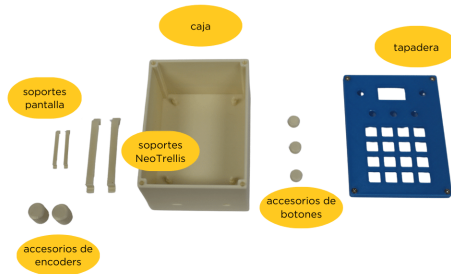
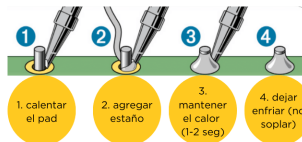


Figura 77: Página 18 de la guía de construcción

6 Soldadura

La soldadura es un proceso de fabricación que permite unir dos o más materiales para ensamblarlos. Para este proceso es necesario contar con un cautín de 20-60 Watts y punta de cincel, un soporte para cautín con inclinación al suelo y almohadilla, estaño, pasta para soldar y alcohol isopropílico. Todos estas herramientas pueden ser accedidas con la autorización correspondiente en los laboratorios de electrónica de la Universidad del Valle de Guatemala.

El proceso de soldadura puede resumirse en 4 pasos:



Es necesario limpiar la punta en la esponja mojada y aplicar una pequeña capa de estaño al inicio y entre conexiones.

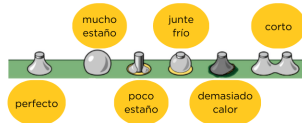
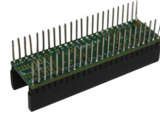


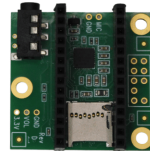
Figura 78: Página 19 de la guía de construcción

Para la construcción de la OR-1, deberás soldar lo siguiente:

Headers hembra de pin largo al Teensy 4.1



Headers hembra de pin largo al Audio Board Rev D



Headers hembra de pin corto a PCB

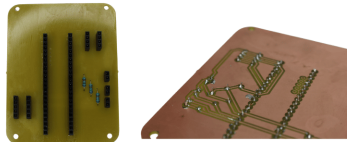
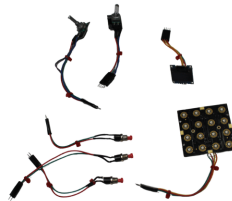


Figura 79: Página 20 de la guía de construcción

Cables dupont a encoders, botones, pantalla y NeoTrellis
utilizando código de color



Cable micro USB a PCB de micro USB hembra



Salida de audio estéreo del Audio Board a jack de 3.5mm



***Puede que no consigas la soldadura perfecta en el primer intento; pero con la práctica mejorará**

Figura 80: Página 21 de la guía de construcción

7 Programación y código fuente

La programación de la OR-1 se realizó utilizando la versión 2.3.2 del Arduino IDE y el lenguaje de programación del mismo entorno. Antes de cargar el código fuente a tu Teensy, deberás realizar las siguientes configuraciones:

1. Verificación inicial del Hardware

Conecta tu Teensy para asegurarte que funcione. Colócala en un protoboard para asegurar estabilidad y conéctala a tu computadora con el cable USB para realizar el test de la LED. Un Teensy nuevo debería tener un programa que hace parpadear el LED naranja lentamente. Si no parpadea, presiona el botón para ponerlo en modo de programación. El LED rojo debería encenderse indicando el modo de programación.

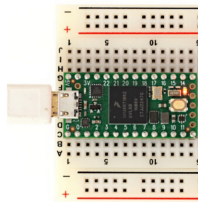


Figura 81: Página 22 de la guía de construcción

2. Instalación del Software Arduino IDE

Descarga e instala la última versión del Arduino IDE (2.3.2) desde el sitio web oficial de Arduino en <https://www.arduino.cc/en/software>.

- Windows: ejecuta el instalador y sigue los pasos.
- MacOS: copia a aplicaciones y ejecuta el archivo instalador. Permite acceso a Documentos si es solicitado.
- Linux: extrae el archivo ZIP y ejecuta el programa.

3. Añadir el URL de Teensy en las preferencias

Al tener el Arduino IDE instalado, selecciona Archivo > Preferencias. En "Additional boards manager" añade: https://www.pjrc.com/teensy/package_teensy_index.json



4. Instala Teensy en Boards Manager

En la pantalla principal de Arduino, abre Boards Manager y busca "Teensy" y haz click en "Instalar".

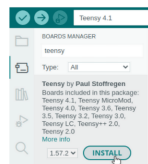


Figura 82: Página 23 de la guía de construcción

5. Instala Teensyduino

Descarga Teensyduino, un complemento para el Arduino IDE que agrega soporte para los microcontroladores Teensy, desde la página oficial de Teensy en:

https://www.pjrc.com/teensy/td_download.html

Arduino 1.8.x Software Development

Teensyduino is a software add-on for the Arduino software.

- [Macintosh Console Software](#)
Supports: Catalina, Big Sur, Monterey, Ventura, Sonoma
- [Macintosh Installer for Arduino on Older Macs](#)
Supports: Mojave
- [Linux Installer \(X86 32 bit\)](#)
- [Linux Installer \(X86 64 bit\)](#)
- [Linux Installer \(ARM 32 bit / Raspberry Pi\)](#)
- [Linux Installer \(ARM 64 bit / Raspberry Pi\)](#)
- [Windows XP / 7 / 8 / 10 / 11 Installer](#)

Uso del Teensy Loader:

El teensy loader es una herramienta que se instala automáticamente con Teensyduino y se ejecuta de fondo cuando se programa el Teensy desde el Arduino IDE.



Figura 83: Página 24 de la guía de construcción

Librerías

Deberás descargar las siguientes librerías:

- [Adafruit_NeoTrellis \(V1.3.3\)](#) de Adafruit
- [Encoder \(V1.4.4\)](#) de Paul Stoffregen
- [Audio](#) (nativa del Teensy AudioBoard)
- [Wire](#) y [SPI](#)
- [SerialFlash](#)
- [Adafruit_GFX \(V1.11.9\)](#)
- [Adafruit_SSD1306 \(V2.5.10\)](#)

Estas librerías fueron utilizadas para la programación del dispositivo y son esenciales para su funcionamiento.

Programación y monitoreo:

Luego de descargar el código fuente desde el GitHub del proyecto y abrirlo en Arduino IDE, compílalo presionando el botón "verificar" (cheque) y luego "cargar" (flecha) en el Arduino IDE.



Puedes monitorear las salidas con el monitor serial.



Figura 84: Página 25 de la guía de construcción

Código fuente

El código fuente cuenta con distintas funciones que cumplen diversos propósitos en el funcionamiento de la OR-1. A continuación, se brinda una pequeña explicación de las funciones más importantes. Se recomienda leer detalladamente el código para comprender cómo se logra llegar a la función que realiza cada una.

1. Funciones de inicialización y configuración:

- *setup()*: configura la comunicación serial, inicializa el hardware y las conexiones de audio.
- *initializeHardware()*: inicializa componentes del hardware como la pantalla SSD1306 y el Trellis, establece los pines de entrada y realiza la animación de inicio.
- *initializeAudioConnections()*: configura los objetos de audio y conexiones entre ellos, incluyendo mezcladores y efectos.
- *assignColors()*: asigna colores a cada pad del Trellis para una mejor distinción visual.

2. Funciones de manejo de la interfaz de usuario

- *toggleProgramMode()*: cambia entre el modo de programación y el modo de reproducción libre.
- *toggleStartStop()*: inicia o detiene la secuencia de reproducción de los sonidos.
- *handleBpmAdjustment()*: ajusta el BPM (beats por minuto) basado en la entrada del encoder principal.
- *toggleFxAdjustmentMode()*: activa o desactiva el modo de ajuste de efectos basado en el estado del botón de efectos.
- *handleEffectsEncoder()*: maneja la selección y ajuste de efectos usando el encoder de efectos.

Figura 85: Página 26 de la guía de construcción

3. Funciones de procesamiento y control de audio

- *updateSequencer()*: actualiza el secuenciador que controla qué *sample* se reproduce en cada paso.
- *handleRepeat()*: maneja la repetición de un sonido específico si se activa el modo de repetición.
- *adjustVolume()*: ajusta el volumen general del sistema.
- *adjustHighPassFreq()*: ajusta la frecuencia del filtro pasa altos.
- *adjustGranularFx()*: modifica los parámetros del efecto granular.
- *adjustFxParameter()*: ajusta los parámetros del efecto activo actualmente basado en la entrada del usuario.

4. Funciones de ayuda y visualización

- *startupAnimation()*: realiza una animación visual en el Trellis al iniciar.
- *printArray()*: imprime el estado actual del secuenciador para propósitos de depuración.
- *displayMenu()*: muestra el menú de efectos en la pantalla.
- *updateDisplay()*: actualiza la pantalla OLED con información como BPM, volumen y estado de los modos.
- *DrawDial()*: dibuja un *dial* en la pantalla para representar valores como volumen o parámetros de efectos.

Los *samples* utilizados durante la programación de la OR-1 son parte de un kit gratuito de drumkit, con los sonidos originales de la *TR-808* de *Roland Corporation*. Se escogieron 16 y se cargaron a la micro SD. Puedes descargarlos en el GitHub del proyecto, o si deseas utilizar otros, puedes cargarlos a tu tarjeta y modificar los nombres en el código fuente.

Figura 86: Página 27 de la guía de construcción

Configuración de salidas de audio

El Teensy inicialmente será configurado como un dispositivo serial con salida de monitoreo por medio del jack para audífonos. Para poder utilizar el puerto micro USB como interfaz y aprovechar la máxima calidad de audio, deberás reconfigurarlo de la siguiente manera en el Arduino IDE: herramientas > USB Type > Audio

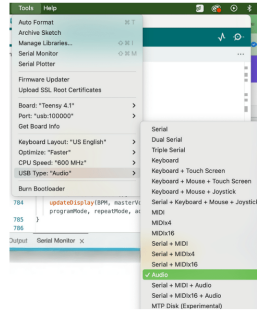


Figura 87: Página 28 de la guía de construcción

8 Ensamblaje

Antes de continuar con el ensamblaje de la OR-1, es necesario que hayas completado todas las secciones anteriores, incluyendo la impresión 3D de la carcasa y haber realizado pruebas de la funcionalidad del circuito PCB utilizando los componentes con sus cables soldados.

Al tener todo listo y los *samples* cargados en la micro SD del AudioBoard, podemos proceder a montar todo en la carcasa en 4 pasos:

1 Colocar el Teensy en su header correspondiente del PCB e introducirlo a la caja. Luego, enroscar la salida de audio en su agujero correspondiente y montar el AudioBoard sobre el Teensy. Posteriormente, conectar el cable micro USB con el PCB hembra y colocarlo en su agujero como se muestra en la imagen.

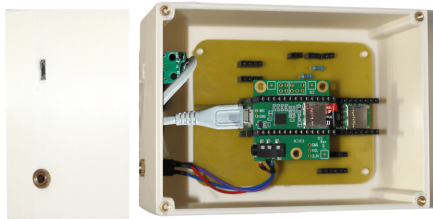
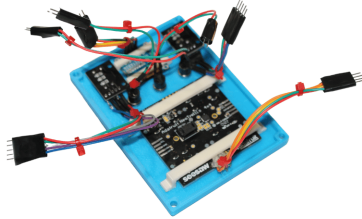


Figura 88: Página 29 de la guía de construcción

- 2 Colocar los componentes de la interfaz de usuario (botones, encoders, NeoTrellis y pantalla) en la tapadera de la caja, junto con los soportes necesarios para los dispositivos I2C.



- 3 Con la ayuda de un cautín, colocar cuidadosamente los insertos de rosca en las cuatro esquinas de la caja generando una ligera presión. Estos se irán deslizando con la ayuda del calor, debes asegurarte que queden rectos.

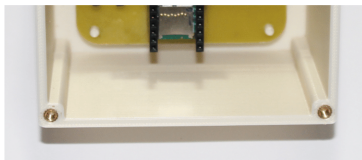


Figura 89: Página 30 de la guía de construcción

- 4 Con mucho cuidado y utilizando como referencia el esquemático, conectar los dispositivos de la tapadera a sus headers designados en el PCB y asegurar la caja utilizando tornillos en las esquinas. Finalmente, añadir los accesorios de los encoders y botones.



Figura 90: Página 31 de la guía de construcción

9 Ejercicios sugeridos

La OR-1 es una máquina con una capacidad relativamente limitada, y la idea de crear tu propio instrumento es poder personalizarlo acorde a tus necesidades. Para esto, se sugiere que explores con el código fuente y crees nuevas funciones que ayuden a potenciar tu creatividad musical. Se proponen los siguientes ejercicios:

- Crea un nuevo efecto/filtro que pueda ser controlado utilizando el knob de efectos:
 - Analiza el código fuente y la cadena de audio que va desde los *samples* a la salida stereo y USB, agregando la nueva funcionalidad a la misma y logrando su reproducción sin afectar el resto de efectos.
 - Agrega el nombre del efecto/filtro al menú de visualización en la pantalla.
 - Asegúrate que el efecto/filtro creado no cause distorsión en la salida al tener el volumen de la OR-1 en su máxima potencia.
- Instrumento MIDI
 - Investiga en la documentación de Teensy en línea si es posible convertir la salida de audio USB a salida MIDI.
 - Modifica el código fuente para cambiar la salida a MIDI.

Figura 91: Página 32 de la guía de construcción

- Agrega la capacidad de reproducir patrones pre creados o guardar patrones directamente desde la máquina.
 - Programa secuencias en el código fuente para que puedan ser seleccionadas utilizando el knob de efectos o alguno de los botones.
 - Añade la función de poder guardar el patrón que programaste con el secuenciador para una futura reproducción del mismo.
- Optimiza la pantalla de visualización con animaciones que le agreguen un toque diferente al instrumento.
 - Mientras no se modifica ningún parámetro, agrega una animación de una persona bailando. Este debe pausarse si se pausa la secuencia.

No existe un límite en cuanto a las cosas que se pueden hacer con la OR-1. Su diseño *Open Source* y la capacidad de personalización de la misma busca que puedas explorar, innovar y desarrollar tus propias aplicaciones creativas.

Figura 92: Página 33 de la guía de construcción

10 GitHub



<https://github.com/andreefuentes/OR1>

Figura 93: Página 35 de la guía de construcción