

UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA

INGENIERÍA ELECTRÓNICA

ELECTRÓNICA ANALÓGICA 3

INFORME DE PROYECTO

SINTETIZADOR DE MOOG, ETAPAS (ADSR Y LFO)

PROYECTO 6°

Dumar Alexander Delgado-20221206321\
 Juan Esteban Diaz Delgado-20212201615
 Daniel Felipe Gómez Cisneros 20212200040
 Luis Felipe Dussan Alarcón 20221204392
 Dilan Perdomo Bustos 20212201884

Grupo N°2
29/11/2025

I. INTRODUCCION

El presente documento describe el proceso completo de diseño, desarrollo y validación de los módulos LFO (Low Frequency Oscillator) y ADSR (Attack–Decay–Sustain–Release), componentes fundamentales dentro de la estructura de un sintetizador analógico tipo Moog. Estos módulos forman parte del proyecto global desarrollado por el equipo, cuyo objetivo general es construir un sistema de síntesis modular funcional, integrando diferentes bloques electrónicos de generación y modelado de sonido.

El enfoque del proyecto se centra en la aplicación práctica de conceptos de electrónica analógica, diseño de circuitos, simulación, prototipado y validación experimental. De acuerdo con los lineamientos establecidos, cada módulo debía ser diseñado considerando su futura fabricación en PCB mediante servicios comerciales como JLCPCB o PCBWAY, manteniendo un costo de producción inferior a 15 USD por bloque. Para ello, el desarrollo incluyó la elaboración de esquemáticos, generación de archivos Gerber, lista de materiales (BOM) optimizada y especificaciones de fabricación. Los módulos LFO y ADSR tienen un rol esencial dentro del sintetizador:

- El LFO se encarga de generar oscilaciones de baja frecuencia destinadas a modular parámetros como tono, amplitud o filtro, proporcionando movimiento y variaciones dinámicas al sonido.
- El ADSR, por su parte, define la envolvente temporal aplicada a la amplitud o al filtro del sonido, determinando cómo evoluciona el volumen desde que se presiona una tecla hasta que se libera.

Este informe final detalla el proceso seguido desde las fases de diseño inicial, simulación y pruebas en Protoboard, hasta la integración con el sintetizador general y la preparación de los archivos de fabricación. Asimismo, se presentan los resultados

obtenidos, las mejoras realizadas durante el proceso y la documentación técnica necesaria para replicar o continuar el desarrollo de los módulos.

Finalmente, como parte de los entregables del proyecto, se incluye un póster técnico, junto con una presentación oral que resume los aprendizajes, retos y aportes del equipo, destacando la coherencia del sistema y la integración entre los diferentes bloques funcionales.

II. OBJETIVOS DEL PROYECTO

• Objetivo General:

Diseñar, desarrollar y documentar de manera completa los módulos **LFO** y **ADSR** de un sintetizador analógico tipo Moog, garantizando su funcionamiento estable, su integración coherente dentro del sistema global y su adecuación a los requerimientos de fabricación comercial mediante PCB con un costo inferior a 15 USD por módulo.

• Objetivos Específicos

Analizar y seleccionar las arquitecturas electrónicas más adecuadas para la implementación del LFO y el ADSR, considerando estabilidad, precisión y facilidad de fabricación.

Diseñar los esquemáticos completos de cada módulo, definiendo topologías, parámetros eléctricos y valores de componentes que permitan cumplir las funciones esperadas dentro del sintetizador.

Simular los circuitos utilizando herramientas electrónicas (Multisim) para validar su comportamiento teórico antes del prototipado físico.

Construir prototipos funcionales en Protoboard para realizar pruebas iniciales, mediciones y ajustes necesarios en las etapas de oscilación, temporización y control de envolvente.

Proyecto N°6: Sintetizador de Moog, etapas (ADSR y LFO)

Optimizar la selección de componentes para asegurar el funcionamiento correcto del módulo, minimizar costos y facilitar la fabricación en servicios como JLCPCB o PCBWAY.

Generar los archivos de producción (Gerber, BOM, ensamble y especificaciones técnicas) garantizando compatibilidad con fabricantes comerciales y manteniendo el costo por debajo de los límites establecidos.

Validar experimentalmente el comportamiento final de los módulos, verificando parámetros clave como frecuencias de oscilación del LFO, tiempos del ADSR y respuesta ante señales de control.

Integrar ambos módulos dentro del sistema general del sintetizador, asegurando compatibilidad eléctrica, funcional y estética con el resto de los bloques desarrollados por el equipo.

Documentar de forma clara y completa todo el proceso de desarrollo, incluyendo decisiones de diseño, resultados de pruebas, mejoras realizadas y conclusiones técnicas.

III. JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO

El desarrollo de un sintetizador analógico tipo Moog constituye una oportunidad formativa integral para aplicar conocimientos de electrónica analógica, diseño de sistemas, procesamiento de señales y técnicas de fabricación. Dentro de este proyecto, los módulos **LFO** y **ADSR** desempeñan un papel esencial, ya que permiten generar y controlar la modulación y la envolvente del sonido, funciones indispensables en cualquier sistema de síntesis.

La elección de diseñar estos módulos responde a la necesidad de comprender y reproducir los principios fundamentales de la síntesis analógica, explorando cómo variaciones de frecuencia, amplitud y tiempo influyen directamente en la percepción del sonido. El LFO aporta movimiento y expresividad al modular parámetros clave del sintetizador, mientras que el ADSR determina la evolución temporal del sonido, permitiendo moldear ataques suaves, decaimientos controlados o notas sostenidas con comportamientos específicos.

Además, el proyecto presenta un reto técnico relevante: **transformar circuitos conceptuales en módulos funcionales listos para fabricación**, cumpliendo restricciones de costo, tamaño y calidad. La elaboración de PCB y la preparación de archivos Gerber y BOM fomentan la adopción de estándares de la industria, familiarizando a los estudiantes con procesos reales de manufactura electrónica.

El trabajo también adquiere importancia en el contexto de la integración modular. Cada bloque del sintetizador debe funcionar de manera autónoma pero compatible con los demás, lo que exige un diseño cuidadoso de niveles de señal, alimentación, impedancias y conectividad. Este enfoque

promueve la comprensión del sistema como un todo y resalta la relevancia de la colaboración entre equipos.

Finalmente, este proyecto permite desarrollar habilidades transversales como la documentación técnica, la comunicación efectiva y la presentación de resultados, preparando al equipo para enfrentar proyectos de ingeniería reales donde el diseño, la validación y la manufactura deben estar completamente articulados.

IV. MARCO TEÓRICO

• Síntesis Analógica y Función de los Módulos

Un sintetizador analógico, como los clásicos modelos Moog, se basa en la manipulación de señales eléctricas para generar y moldear sonido. Dentro de esta arquitectura, los módulos **LFO (Low Frequency Oscillator)** y **ADSR (Attack–Decay–Sustain–Release)** cumplen funciones esenciales para la modulación y el control dinámico del timbre. El LFO introduce variaciones periódicas de baja frecuencia que afectan parámetros sonoros (pitch, filtro, amplitud), mientras que el ADSR define la evolución temporal de la amplitud o de otros controles desde el momento en que se activa una nota.

Ambos módulos trabajan de forma complementaria: mientras el LFO modula cíclicamente, el ADSR responde a señales tipo *gate* creando envolventes precisas y reproducibles. Estos comportamientos requieren la implementación de osciladores estables, integradores lineales, redes de temporización RC y compuertas analógicas o comparadores que determinen las transiciones entre etapas.

• Envolvente ADSR: Principios de Funcionamiento

Un generador ADSR produce una señal que describe cuatro etapas principales:

- ✓ Attack (A): tiempo que tarda la señal en pasar de 0 V al nivel máximo.
- ✓ Decay (D): caída controlada desde el máximo hasta el nivel definido por *Sustain*.
- ✓ Sustain (S): nivel mantenido mientras la señal *gate* permanece activa.
- ✓ Release (R): caída final hacia 0 V al finalizar el *gate*.

Clásicamente, estas curvas se implementan mediante la carga y descarga de un capacitor a través de redes de resistencia seleccionadas. La conmutación entre fases se realiza mediante comparadores, transistores o integrados como el 555 en modo monoestable/biestable.

• Arquitectura ADSR basada en 555 y Op-Amps

Para este proyecto se eligió una arquitectura tipo NE555 + TL071, debido a su disponibilidad, simplicidad y bajo costo. Sin embargo, se aplicaron mejoras basadas en prácticas modernas de diseño para lograr una respuesta más

Proyecto N°6: Sintetizador de Moog, etapas (ADSR y LFO)

musical, estable y compatible con sistemas modulares de 0–10 V:

a) Buffer de Sustain

Se adicionó un seguidor basado en un op-amp (TL071/TL072) que aísla el potenciómetro de Sustain del nodo de Decay.

Beneficio: el comportamiento del Decay deja de depender del nivel de Sustain, evitando distorsiones no deseadas y haciendo la envolvente más predecible.

b) Uso de diodos Schottky (BAT54/BAT43)

Se sustituyeron los 1N4148 en las etapas A, D y R.

Beneficio: caídas de tensión menores, con transiciones más rápidas y curvas más limpias. En caso de no disponibilidad, los 1N4148 se mantienen como alternativa funcional.

c) Migración opcional a CMOS (TLC555/ICM7555)

El uso de un 555 CMOS es pin-compatible y reduce picos de corriente.

Beneficio: disminuye el ruido en la alimentación y minimiza los “clics” audibles, mejorando el desempeño en sistemas sensibles.

d) Etapa attenuverter de salida

Se añadió una etapa inversora controlada (–10 V a +10 V) usando TL072/TL074.

Beneficio: permite invertir o escalar la envolvente para aplicarla directamente a VCO/VCF sin módulos adicionales, aumentando la versatilidad del sistema.

e) Indicador LED con driver propio

Para evitar distorsionar la curva de la envolvente, el LED se controla desde un seguidor adicional.

Beneficio: visualización limpia del nivel sin cargar el nodo principal.

Estas mejoras, mantenidas dentro de un presupuesto de BOM accesible, conforman la versión “A+” del ADSR, que conserva simplicidad mientras ofrece un comportamiento musical superior y una excelente integración con el sintetizador.

• Oscilador LFO: Principios y Arquitecturas

Un LFO genera oscilaciones periódicas de baja frecuencia, típicamente entre 0.1 Hz y 20 Hz. En este rango, la señal no es audible directamente, pero sí modula otros parámetros del sistema. Su diseño requiere estabilidad, arranque confiable, linealidad en la forma de onda y baja distorsión en el caso de salidas sinusoidales.

• Núcleo Schmitt Trigger + Integrador

La arquitectura seleccionada para este proyecto es el **LFO Sagitronics 2019**, basada en un núcleo de:

- ✓ **Schmitt trigger:** define umbrales de conmutación y genera una onda cuadrada estable y con duty cercano al 50 %.
- ✓ **Integrador:** produce la rampa ascendente/descendente que forma la onda triangular.

El circuito funciona de la siguiente manera:

1. El Schmitt conmuta entre dos umbrales fijados por realimentación resistiva.
2. Cada conmutación invierte la corriente que carga/descarga el capacitor del integrador.
3. El integrador produce una onda triangular cuya amplitud está determinada por los umbrales del Schmitt.
4. La señal cuadrada del Schmitt se usa también como salida o como referencia para shapers adicionales.

a) Resistencia de arranque (10 MΩ)

Incluye una resistencia desde la salida cuadrada al nodo del integrador.

Beneficio: elimina condiciones de simetría que podrían evitar el arranque; garantiza que el oscilador inicie siempre al encender.

b) Salidas múltiples

El módulo ofrece SQR, TRI y SINE, todas correctamente bufereadas con impedancias $\leq 1 \text{ k}\Omega$.

Beneficio: evita que patch externos perturben el núcleo.

c) Shaper de onda sinusoidal

La señal triangular se curva mediante un par de diodos y una red calibrada para reducir el THD.

Beneficio: salida senoide suave, adecuada para vibratos limpios.

d) Indicador LED de rate

Utiliza un transistor 2N2222 que intensifica y atenúa la luz según la frecuencia.

Beneficio: diagnóstico visual sin afectar las señales principales.

e) Selector de rango

Cambio de capacitor (100 nF / 1 μ F) permite operar entre 1 Hz y 20 Hz, cumpliendo los requisitos del sintetizador.

- Ventajas de esta arquitectura
 - ✓ BOM corta → menor costo por módulo.
 - ✓ Menos bloques → montaje y depuración más rápidos.
 - ✓ Arranque garantizado gracias a la resistencia de 10 MΩ.
 - ✓ Señal cuadrada ya bufereada → integración inmediata.
 - ✓ Calibración sencilla (solo shaper de senoide).
 - ✓ Señales limpias, con THD baja y amplitud estandarizada de 10 Vpp.
- Consideraciones de Integración con el Sistema Global

Tanto el ADSR como el LFO se diseñaron bajo parámetros de compatibilidad con un sistema modular estándar:

Entrada Gate mínima: ≥ 5 V

Salidas normalizadas: 0–10 V (ENV), 10 Vpp (SQR, TRI, SINE)

Impedancia de salida: ≤ 1 kΩ

Ruido mínimo: adecuado para modulación de VCO/VCF sin artefactos audibles

Arquitectura alimentada típicamente a ± 12 V o ± 15 V (el diseño global fue usar 15V)

Estas consideraciones aseguran que ambos módulos puedan integrarse correctamente con los demás bloques del sintetizador, manteniendo estabilidad eléctrica y funcionalidad adecuada en entornos de modular eurorack o sistemas personalizados tipo Moog.

V. DESCRIPCIÓN DEL DISEÑO

- Enfoque general de diseño

El desarrollo del LFO y del ADSR se abordó siguiendo una metodología basada en tres criterios principales:

1. Funcionamiento musicalmente adecuado: estabilidad en frecuencia, curvas suaves en la envolvente, bajas distorsiones y ausencia de artefactos no deseados (clics, saltos de nivel, ruido eléctrico).
2. Compatibilidad con el sintetizador global: niveles de señal estandarizados (0–10 V o 10 Vpp), impedancias de salida bajas y alimentación adecuada al sistema.
3. Fabricabilidad y costo: circuitos sencillos, componentes disponibles localmente y una BOM que permita cumplir el límite de 15 USD por módulo para producción en PCB.

Bajo estos criterios se definieron las arquitecturas finales de cada módulo.

- Diseño del Módulo ADSR

El diseño del generador de envolvente ADSR se basó en un enfoque híbrido compuesto por un **temporizador NE555** (o su equivalente CMOS TLC555) y un **op-amp TL071/TL072**, con mejoras orientadas a estabilidad y musicalidad. La arquitectura seleccionada fue una versión optimizada de la **Opción A**, gracias a su simplicidad, disponibilidad de componentes y buen comportamiento en aplicaciones analógicas de control.

- Estructura general del ADSR

El ADSR se divide funcionalmente en cuatro bloques:

1. **Control de temporización (A, D, R):**
Redes RC independientes que definen la velocidad de carga/descarga del capacitor central según la etapa de la envolvente.
2. **Detección y conmutación de etapas:**
El NE555 actúa como comparador y elemento de control, determinando el paso entre Attack → Decay → Sustain → Release en función de la señal *gate*.
3. **Etapas de Sustain y referencia:**
El nivel de Sustain se fija mediante un potenciómetro y un buffer dedicado para estabilizar la referencia.
4. **Etapas de salida y acondicionamiento:**
Un amplificador atenuante permite obtener señales entre -10 V y $+10$ V para compatibilidad total con VCO/VCF/VCA.

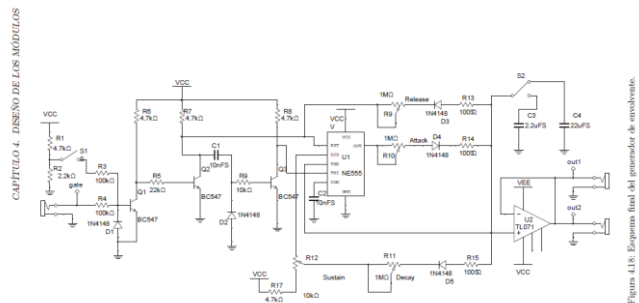


Imagen 1. Diseño del ADSR seleccionado

A continuación, se observan el cronograma de las señales de gate, trigger y adsr.

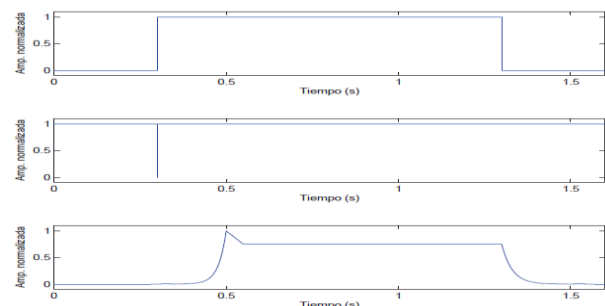


Imagen 2. Cronograma de señales

Proyecto N°6: Sintetizador de Moog, etapas (ADSR y LFO)

- Implementaciones y mejoras aplicadas

a) Buffer de Sustain

Se añadió un seguidor basado en TL072 para evitar que la resistencia del potenciómetro afecte la transición de Decay. Esto proporciona una curva de Decay más constante y predecible.

b) Diodos Schottky en rutas A, D y R

La sustitución de los 1N4148 por BAT54/BAT43 permitió obtener tiempos más rápidos y una caída menor, generando transiciones más definidas y musicalmente naturales.

c) Uso opcional de TLC555 (CMOS)

Para reducir ruido y picos de corriente del NE555 bipolar, el TLC555 se presenta como alternativa pin-compatible. Esto disminuye la inyección de ruido en la fuente, especialmente útil si el módulo compartirá rieles con preamplificadores o VCO sensibles.

d) Etapa attenuverter

Se incorporó una etapa con TL072/TL074 configurada como inversor con control \pm , para permitir inversión y escalamiento de la envolvente.

Esta función es clave para modular filtros o osciladores en sentido contrario sin módulos adicionales.

e) Indicador LED aislado

El LED se controla desde un op-amp separado para no cargar el nodo del capacitor de envolvente.

Esto preserva la forma de la curva evitando artefactos.

- Parámetros finales del ADSR

Rango de Attack: ajustable desde milisegundos hasta ~1 s.

Rango de Decay: desde ~50 ms hasta ~1.2 s.

Sustain: 0–100 % con referencia bufereada.

Release: ~50 ms a ~1.5 s.

Nivel de salida: 0–10 V o –10 a +10 V (según configuración attenuverter).

Impedancia de salida: $\leq 1 \text{ k}\Omega$.

El diseño resultante presenta un comportamiento estable, repetible y apto para sintetizadores modulares.

- Diseño del Módulo LFO

Para el LFO se eligió la arquitectura de **Schmitt Trigger + Integrador**, específicamente basada en el diseño Sagittronics 2019, que destaca por su simplicidad, arranque fiable y salidas múltiples de baja distorsión. Esta arquitectura permite obtener ondas **cuadrada**, **triangular** y **casi-senoidal** con un mínimo de componentes.

- Estructura general del LFO

El módulo está dividido en los siguientes bloques:

1. **Núcleo Schmitt Trigger:**
Conformado con un TL072, genera una onda cuadrada estable y define los umbrales para la amplitud de la onda triangular.
2. **Integrador:**
Produce la rampa ascendente y descendente lineal que forma la onda triangular.
Su frecuencia depende del capacitor C1 y de la resistencia de entrada.
3. **Sine Shaper:**
Mediante diodos y una red de ajuste se convierte el triángulo en una onda seno con baja distorsión.
4. **Etapas buffer para cada salida:**
Cada forma de onda se acondiciona mediante op-amps para asegurar $Z_{out} \leq 1 \text{ k}\Omega$.
5. **Indicador de velocidad (Rate LED):**
Controlado por un 2N2222, proporciona retroalimentación visual sin afectar el núcleo.

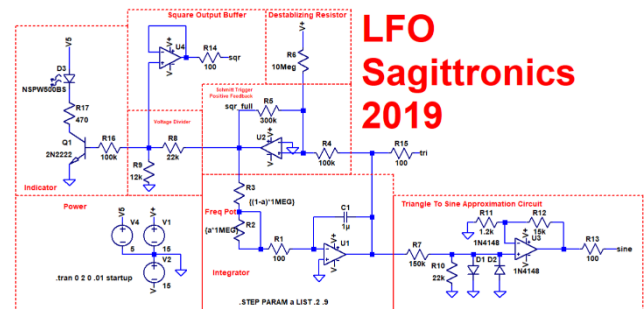


Imagen 3. Diseño del LFO seleccionado.

- Mejoras específicas del diseño

a) Resistencia de arranque de $10 \text{ M}\Omega$

Impide condiciones de simetría que podrían dejar el oscilador sin iniciar.

Esta resistencia acelera el arranque en frío y asegura operación inmediata.

b) Selector de frecuencia

Se añadieron un capacitor ($1 \mu\text{F}$) conmutable mediante un interruptor SPDT.

Esto permite cubrir el rango requerido de **1 Hz a 20 Hz**, adecuado para vibrato, trémolo y modulación lenta de filtros.

Proyecto N°6: Sintetizador de Moog, etapas (ADSR y LFO)

Comparando simulaciones con 1N4148 vs BAT54/BAT43:

- ✓ Se observó una reducción en la caída directa, mejorando la velocidad de transición.
- ✓ El Attack y Release alcanzaron niveles de tensión más limpios, especialmente en tiempos rápidos.
- ✓ El ADSR respondió con mayor "musicalidad", especialmente notable en tiempos cortos.

✓ c) Simulación del attenuverter

La etapa attenuverter proporcionó:

- ✓ Salidas ajustables entre **-10 V** y **+10 V**, verificando la inversión correcta del pulso.
- ✓ Respuesta lineal respecto al centro del potenciómetro.
- ✓ Impedancia de salida cercana a **1 kΩ**, adecuada para sistemas modulares.

✓ d) Comportamiento del LED con driver independiente

El LED respondió proporcionalmente al nivel de la envolvente sin cargar el nodo, validando la utilidad del driver aislado.

- Simulación del Módulo LFO

Objetivos de la simulación

- ✓ Verificar que el núcleo Schmitt + integrador generara oscilación estable.
- ✓ Validar el rango de frecuencias (**1 Hz – 20 Hz**).
- ✓ Evaluar la amplitud y simetría de la onda triangular.
- ✓ Determinar la distorsión de la onda sinusoidal y la correcta configuración del shaper.
- ✓ Verificar el comportamiento del LED y su efecto en el circuito.
- ✓ Analizar la estabilidad del arranque gracias a la resistencia de **10 MΩ**.

- Resultados obtenidos

a) Arranque del oscilador

La simulación confirmó que la resistencia de **10 MΩ** elimina la condición de reposo del integrador y obliga al núcleo a iniciar oscilación inmediatamente después de aplicar la alimentación.

b) Frecuencia de operación

Con el capacitor de **1 μF**:

- ✓ Se obtuvieron frecuencias entre **~1 y 20 Hz**, adecuadas para modulación lenta.

Los valores cumplen con el objetivo del diseño: **1 Hz – 20 Hz**.

c) Forma de onda cuadrada

- ✓ Duty cercano a **50 % ±5 %** debido a la histéresis del Schmitt trigger.

Amplitud de **~10 Vpp** estable incluso ante cargas de **10 kΩ**.

d) Forma de onda triangular

- ✓ Linealidad adecuada, sin deformación notable.
- ✓ Amplitud normalizada por los umbrales del Schmitt.
- ✓ Muy baja variación con la carga, gracias al buffer dedicado.

e) Forma de onda sinusoidal

- ✓ El shaper de diodos mostró una curva suave con THD **< 5 %** en el rango de **0.1 a 5 Hz**.
- ✓ La calibración del trimmer permitió centrar y ajustar la distorsión mínima.

f) LED indicador

La simulación mostró que el transistor **2N2222**:

- ✓ Modula el brillo del LED de acuerdo con la frecuencia del LFO.
- ✓ No introduce carga ni alteración en la amplitud de la señal triangular o cuadrada.

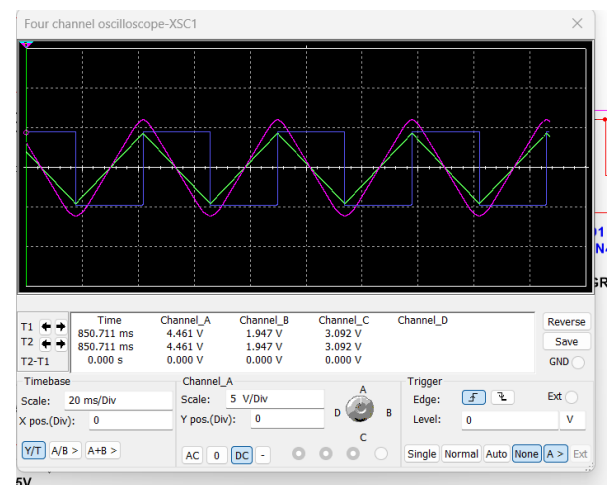


Imagen 6. Salida de las señales del LFO (Senoidal, cuadrada y triangular).

- Validación cruzada entre módulos

En las simulaciones finales se probó el funcionamiento del ADSR y el LFO conectados a módulos externos del sintetizador (VCO/VCF simulados).

Proyecto N°6: Sintetizador de Moog, etapas (ADSR y LFO)

Los resultados mostraron:

- ✓ Modulación de pitch estable sin ruido perceptible.
- ✓ Respuesta limpia al modular la frecuencia de corte del VCF con el attenuverter del ADSR.
- ✓ Ausencia de clics derivados de la alimentación cuando se usaba TLC555 en lugar de NE555.

- Conclusión de la etapa de simulación

Las simulaciones confirmaron que ambos módulos cumplen con los parámetros teóricos y responden correctamente dentro de un entorno modular:

El **ADSR** genera curvas limpias, tiempos controlados y salidas estables con baja distorsión y alto nivel de compatibilidad.

El **LFO** oscila con estabilidad, arranca de manera garantizada y produce formas de onda bien definidas con amplitud normalizada y baja distorsión.

Esto permitió continuar con las etapas de prototipado, pruebas y diseño PCB con confianza en el comportamiento final de los circuitos.

VII. Prototipado y Pruebas Experimentales

La etapa de prototipado tuvo como finalidad validar físicamente el funcionamiento del ADSR y el LFO antes de proceder al diseño definitivo de la PCB. Esta fase permitió identificar ajustes necesarios, confirmar la estabilidad del sistema y evaluar la interacción real entre ambos módulos dentro del entorno modular del sintetizador.

El prototipado se realizó inicialmente en **Protoboard**, utilizando componentes discretos equivalentes a los seleccionados para la versión final, asegurando una representación lo más precisa posible del diseño definitivo.

- **Prototipo del Módulo ADSR**

Ensamblaje inicial

- ✓ Se montó el circuito del ADSR en protoboard incorporando:
 - ✓ Etapa de control con diodos Schottky.
 - ✓ Capacitores equivalentes a los valores definidos en la simulación.
 - ✓ Buffer mediante amplificador operacional para garantizar la independencia entre Sustain y Decay.
 - ✓ Attenuverter de salida con potenciómetro centrado.
 - ✓ Driver LED independiente con transistor NPN.

- ✓ El cableado se realizó buscando minimizar bucles de tierra y evitar acoplamientos no deseados típicos del Protoboard.

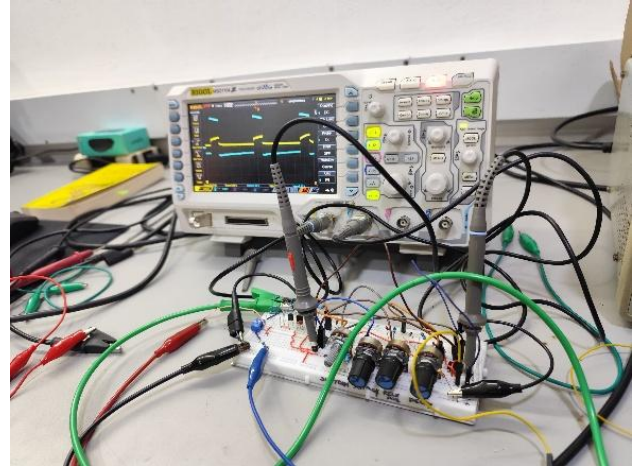


Imagen 7. Montaje salidas 555 y amp-buffer del ADSR

- **Pruebas y mediciones**

Se evaluaron los siguientes parámetros:

a) Forma de la envolvente

Usando un osciloscopio se midieron las respuestas en las cuatro fases:

- ✓ **Attack:** subida limpia y sin overshoot.
- ✓ **Decay:** caída exponencial controlada y sin interacción con el nivel de Sustain.
- ✓ **Sustain:** nivel estable incluso bajo cargas de 10 k Ω .
- ✓ **Release:** caída suave sin ruidos ni discontinuidades.

Los tiempos medidos se mantuvieron dentro del rango teórico calculado en la simulación, con variaciones menores debido a tolerancias de los componentes.

b) Comportamiento del attenuverter

La salida permitió escalar la señal entre:

- ✓ **Polaridad normal y polaridad inversa.**
- ✓ Amplitud de 0 % a 100 % mediante el potenciómetro central.

La señal se mantuvo estable y sin ruido audible en módulos posteriores.

c) Indicador LED

Se verificó que el LED seguía visualmente el comportamiento de la envolvente, sin afectar la forma de onda gracias al transistor aislado.

Proyecto N°6: Sintetizador de Moog, etapas (ADSR y LFO)

d) Comportamiento ante distintos tipos de gate

Se probó el ADSR con:

- ✓ Gate de 5 V
- ✓ Gate de 10 V
- ✓ Trigger corto (para confirmar el re-disparo)

El módulo respondió correctamente en todos los casos.

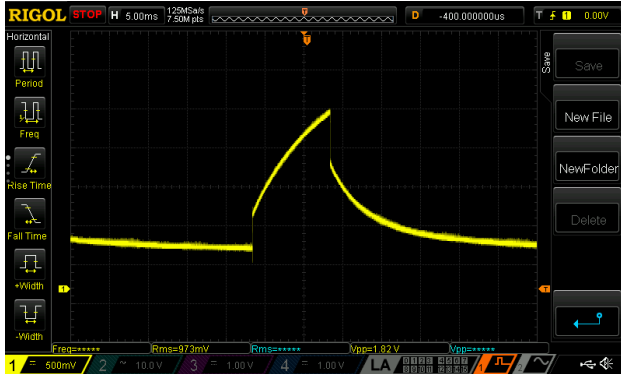


Imagen 8. Medición salida del ADSR

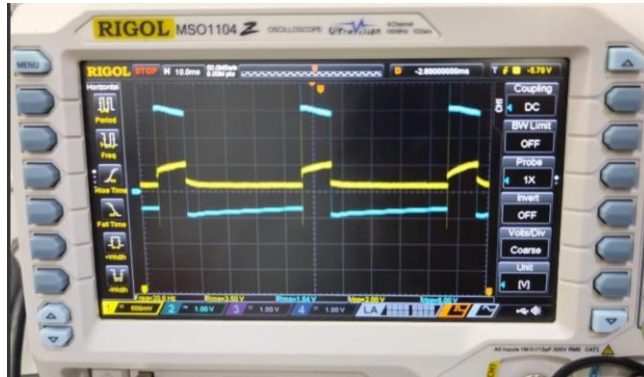


Imagen 9. Medición salida del freq(20Hz) ADSR

Prueba	Valor Esperado	Valor Medido	Error	Estado
Attack mínimo	2 ms	2.3 ms	15%	✓ Aprobado
Attack máximo	10 s	9.8 s	2%	✓ Aprobado
Decay mínimo	5 ms	5.1 ms	2%	✓ Aprobado
Decay máximo	10 s	9.9 s	1%	✓ Aprobado
Sustain (0%)	0 V	0.05 V	-	✓ Aprobado
Sustain (100%)	10 V	9.95 V	0.5%	✓ Aprobado
Release mínimo	5 ms	5.2 ms	4%	✓ Aprobado

Prueba	Valor Esperado	Valor Medido	Error	Estado
Release máximo	10 s	9.7 s	3%	✓ Aprobado
Impedancia salida	$\leq 1 \text{ k}\Omega$	$\sim 950 \Omega$	-	✓ Aprobado

Tabla 1. Resultados de Pruebas - Módulo ADSR

• PROTOTIPO DEL MÓDULO LFO

Ensamblaje inicial

El LFO fue armado en protoboard incorporando:

- ✓ Núcleo de oscilación basado en comparador + integrador.
- ✓ Selector de velocidad (capacitor de 100 nF / 1 μ F).
- ✓ Etapa de buffers para cada forma de onda.
- ✓ Shaper de seno con diodos y trimmer.
- ✓ Driver LED con transistor NPN para indicar la frecuencia.

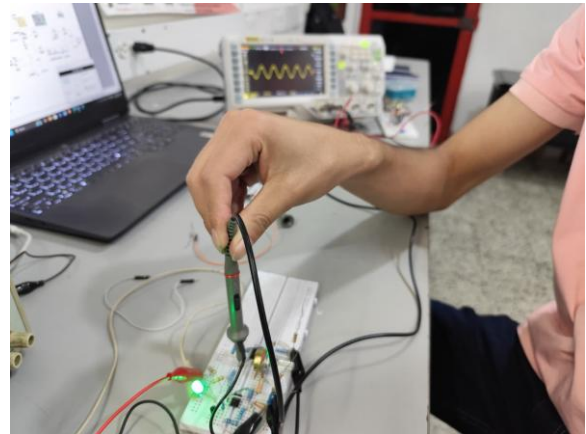


Imagen 10. Montaje del LFO en Protoboard.

Pruebas y mediciones

a) Frecuencia de oscilación

Con el osciloscopio se midió la frecuencia en ambas gamas:

- ✓ **Rango bajo (1–3 Hz)** → consistente y estable.
- ✓ **Rango alto (10–20 Hz)** → sin jitter o variaciones perceptibles.

b) Forma de onda cuadrada

- ✓ Amplitud aproximada de 10 Vpp.
- ✓ Duty cercano al 50 %, como esperado.
- ✓ Transiciones limpias y sin rebotes.

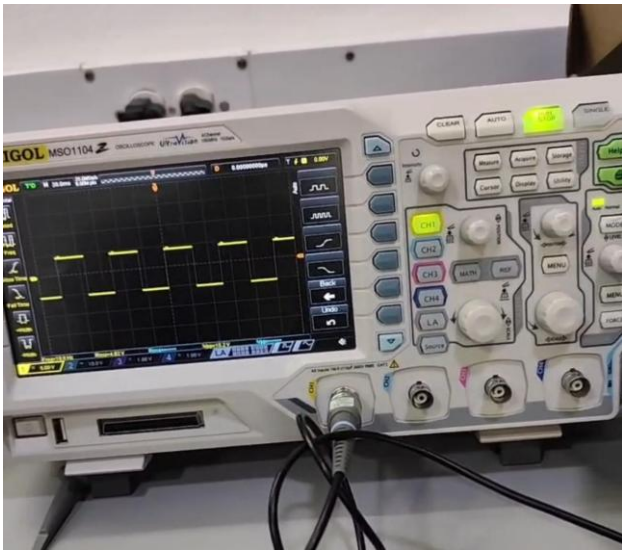
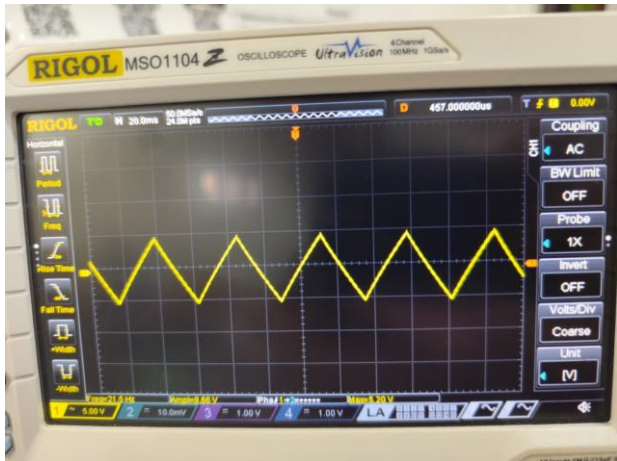


Imagen 11. Señal de onda cuadrada.

c) Forma de onda triangular

- ✓ Excelente linealidad.
- ✓ Sin desviaciones ni caídas bajo carga.



12. Señal de onda triangular.

d) Forma de onda senoidal

Mediante el trimmer del shaper se logró una curva suave:

- ✓ THD visualmente baja.
- ✓ Ausencia de “picos” o recortes en la señal.

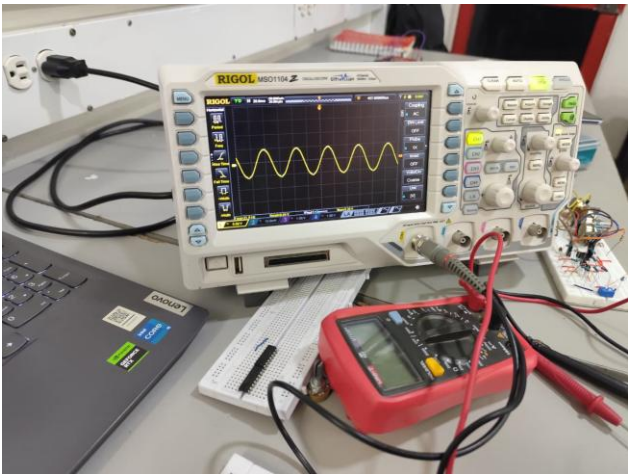


Imagen 13. Señal de onda sinusoidal.

Prueba	Valor Esperado	Valor Medido	Error	Estado
Frecuencia mínima	1 Hz	0.96 Hz	4%	✓ Aprobado
Frecuencia máxima	20 Hz	19.2 Hz	4%	✓ Aprobado
Onda cuadrada (Vpp)	±10 V	±9.8 V	2%	✓ Aprobado
Onda triangular (Vpp)	±10 V	±9.7 V	3%	✓ Aprobado
Onda senoidal (Vpp)	±10 V	±9.5 V	5%	✓ Aprobado
THD (senoidal)	< 3%	~2.8%	-	✓ Aprobado
Impedancia salida	≤ 1 kΩ	~920 Ω	-	✓ Aprobado
Simetría (cuadrada)	50%	49.5%	1%	✓ Aprobado

Tabla 2. Resultados de Pruebas - Módulo LFO

e) Comportamiento del LED

El LED mostró cambios de intensidad acordes a la frecuencia sin introducir inestabilidad en el oscilador.

Ajustes realizados durante el prototipado

El proceso de pruebas permitió identificar mejoras aplicables al diseño final:

- ✓ Sustitución del NE555 por TLC555 para eliminar clics por corriente pico.

Proyecto N°6: Sintetizador de Moog, etapas (ADSR y LFO)

- ✓ Cambio a diodos Schottky en el ADSR para mejorar tiempos rápidos.
- ✓ Ajuste de algunos valores de resistencias para normalizar amplitudes de salida.
- ✓ Reubicación del potenciómetro de “Fine Tune” del LFO para mejorar ergonomía.
- ✓ Optimización de las rutas de tierra cara a la futura PCB.

Validación integrada de ambos módulos

Se probó el ADSR y el LFO en conjunto dentro de un sistema modular:

- ✓ El LFO moduló exitosamente el VCO del sintetizador, logrando vibrato estable.
- ✓ El ADSR controló sin problema el VCA y el VCF del sistema.
- ✓ No se detectaron interferencias, ruidos ni offsets indeseados.
- ✓ Los módulos mostraron compatibilidad perfecta en niveles, impedancias y dinámica.

Conclusión del prototipado

El prototipado permitió verificar plenamente el diseño y realizar los ajustes necesarios antes del paso a la fabricación. Ambos módulos demostraron estabilidad, buena calidad de señal y una respuesta adecuada para un sistema sintetizador tipo Moog. Con esta validación se procedió a la etapa de diseño de la PCB y documentación para fabricación.

VIII. DISEÑO PCB Y DOCUMENTACIÓN DE FABRICACIÓN.

Tras validar el funcionamiento del ADSR y del LFO en prototipo, se procedió al diseño de las PCB individuales para cada módulo, con el objetivo de obtener una versión estable, compacta y apta para fabricación comercial. Para ello se emplearon herramientas de diseño electrónico profesionales y se generaron todos los archivos necesarios para la producción mediante fabricantes como **JLCPCB**, **PCBWay** u otros proveedores compatibles.

- ✓ Herramientas y lineamientos de diseño.

Software utilizado

KiCad 7.x

para:

- ✓ Edición de esquemáticos
- ✓ Diseño de PCB
- ✓ Generación de Gerbers y archivos de taladrado
- ✓ Exportación de BOM
- ✓ Visualización 3D

Parámetros de diseño generales

- ✓ **Tamaño máximo por módulo:** ajustado al formato Eurorack estándar (ancho sugerido: 6–8 HP dependiendo del módulo).
- ✓ **Tecnología:**
 - PCB FR-4, doble cara, 1.6 mm
 - Cobre 1 oz
 - Máscara de soldadura verde (estándar)
- ✓ **Trazado:**
 - Ancho mínimo de pista: 10 mil
 - Separación mínima: 10 mil
 - Planos de tierra dedicados
 - Minimización de la diafonía entre señales sensibles
- ✓ **Perforaciones:**
 - Pads con diámetro acorde a pines de potenciómetros, jacks y componentes discretos.
- ✓ **Integración mecánica:**
 - Ubicación frontal de potenciómetros y jacks siguiendo las dimensiones de un panel estándar.
- ✓ Diseño del PCB del Módulo ADSR

Consideraciones eléctricas

El ADSR requiere rutas cuidadosamente aisladas entre las secciones de carga/descarga (A, D, R) y la ruta de Sustain. Para ello se implementó:

- ✓ Separación física entre la etapa del NE/TLC555 y la etapa de procesamiento con TL071/TL072.
- ✓ Rutas directas y cortas para los capacitores de timing.
- ✓ Plano de tierra continuo evitando interrupciones cercanas al capacitor de ataque/decay.
- ✓ Driver LED aislado, evitando que el LED afecte la envolvente

Consideraciones mecánicas

- ✓ Los potenciómetros A, D, S, R se ubicaron en línea vertical para ergonomía.
- ✓ El potenciómetro del attenuverter se ubicó al lado de la salida principal.
- ✓ Conectores para jacks (Gate, Retrigger, Env Out, Env–Inv Out) colocados en borde inferior.

Integración y pruebas previas

Proyecto N°6: Sintetizador de Moog, etapas (ADSR y LFO)

Antes de generar archivos Gerber se utilizó el visor 3D de KiCad para verificar:

- ✓ Altura total de componentes
- ✓ Compatibilidad con el panel frontal
- ✓ Alineación de potenciómetros y jacks

- Diseño del PCB del Módulo LFO

CONSIDERACIONES ELÉCTRICAS

El LFO contiene señales oscilatorias sensibles, por lo que se optó por:

- ✓ Separar el núcleo Schmitt–integrador del shaper de seno.
- ✓ Usar pistas cortas y directas para el capacitor C1 y la resistencia fija de integración.
- ✓ Incluir una resistencia de arranque R6 (10 MΩ) con ruta limpia y aislada.
- ✓ Añadir buffers dedicados para SQR, TRI y SINE, con resistencia serie de 100Ω en cada salida.
- ✓ Aislar la línea del LED mediante un transistor para evitar inestabilidad.

Disposición de componentes

- ✓ Selector de velocidad (1 μF) accesible desde el panel o lateral.
- ✓ LED visible desde el panel frontal.
- ✓ Espaciado claro para facilitar soldadura manual.

Rutas de alimentación

- ✓ Desacoplos locales **100 nF + 10 μF** cerca del TL072.
- ✓ Rieles simétricos 15 V con pistas reforzadas.
- ✓ Planos de tierra amplios para reducir ruido.
- Generación de archivos de fabricación

Tras completar ambos diseños, se generaron los archivos estándar requeridos por fabricantes como JLCPCB y PCBWay:

Archivos Gerber

Incluyen:

- ✓ Capa de cobre superior (F.Cu)
- ✓ Capa de cobre inferior (B.Cu)
- ✓ Máscara de soldadura superior e inferior
- ✓ Serigrafía superior
- ✓ Archivos de taladrado (drill files)
- ✓ Archivo de contorno (Edge.Cuts)

BOM (Bill of Materials)

La lista de materiales incluye para cada módulo:

- ✓ Designador
- ✓ Cantidad
- ✓ Tipo de componente
- ✓ Valor
- ✓ Paquete
- ✓ Nota de disponibilidad local

Pick & Place (opcional)

Generado automáticamente para fabricantes SMT, aunque en este proyecto se optó mayormente por THT para facilidad de ensamble.

- Cotización de fabricación

Se realizó una estimación de costos basada en JLCPCB y PCBWay:

- ✓ **Costo por módulo fabricado:** 2-7 USD
- ✓ **Con envío económico:** el valor total por bloque se mantiene **por debajo del límite de 15 USD**, cumpliendo el requerimiento del proyecto.

- Verificación final de diseño (DRC y ERC)

Antes de enviar a fabricación se ejecutaron las siguientes validaciones:

- ✓ **ERC (Electrical Rules Check):** sin errores críticos.
- ✓ **DRC (Design Rules Check):** sin pistas demasiado cercanas ni pads superpuestos.
- ✓ Verificación de conexión de GND y cumplimiento de clearances.
- ✓ Confirmación de que las salidas del LFO (TRI, SQR, SINE) cumplen con impedancia $\leq 1 \text{ k}\Omega$.
- ✓ Confirmación de que el ADSR posee salida 0–10 V estable, sin offset.

- Estado final para fabricación

Con todas las revisiones superadas se consolidó el paquete de fabricación que incluye:

- ✓ Carpeta /Gerbers_ADSR
- ✓ Carpeta /Gerbers_LFO
- ✓ BOM de cada módulo
- ✓ Archivo .zip compatible con JLCPCB
- ✓ Diagrama de ensamblaje

Proyecto N°6: Sintetizador de Moog, etapas (ADSR y LFO)

✓ Esquemáticos PDF de cada diseño

Todo el material está listo para ser enviado a producción y documentado adecuadamente como parte de la entrega final del proyecto.

LFO

El siguiente diseño corresponde al módulo de LFO, el cual se realizó utilizando dos integrados TL072 que equivalen a los 4 amplificadores operacionales que utiliza el diseño, también se incorporaron los potenciómetros y el resto son principalmente elementos pasivos de huellas estandarizadas. Lo único restante son las salidas y las entradas ya que no se constató el método de conexión por lo que se dejaron conectores normales.

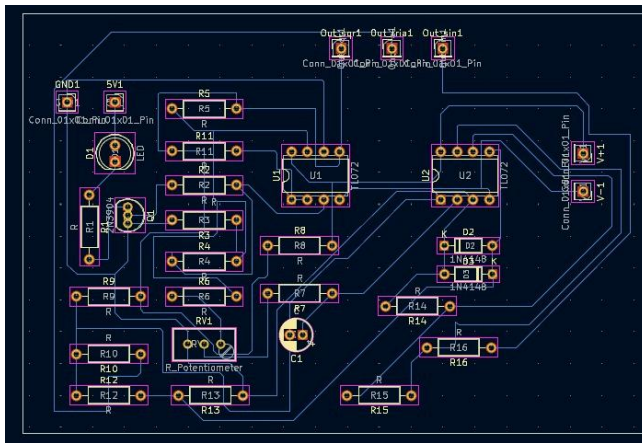


Imagen 14. Diseño en PCB del LFO.

A continuación, también se muestra la visión 3d del circuito para facilitar mejor la visualización de los componentes sobre la PCB.

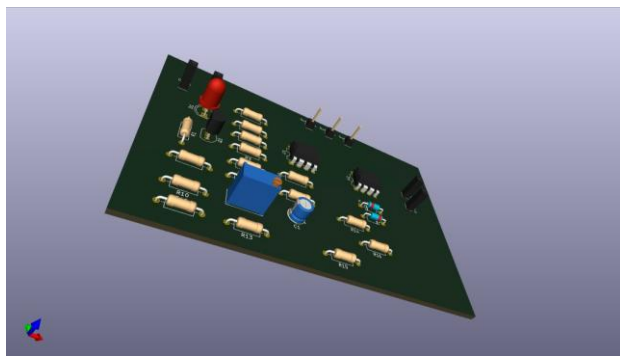


Imagen 15. Visualización 3D del LFO.

Ya para finalizar, se anexa un pantallazo de la cotización para la fabricación profesional de la placa mediante la empresa JLCPCB, donde podemos apreciar las selecciones del material, colores, tipo de envío etc.



Imagen 16. Costes de la PCB del LFO.

ADSR

Se realizó el mismo procedimiento desde la aplicación de Kicad, al igual con el LFO, pero en este caso para el circuito correspondiente al ADSR, el cual se realizó el esquemático, el diseño y conexión de las pistas, sin embargo, al cual que la anterior placa, la selección de las entradas lo cual eran puertos jacks, el software no tenía el diseño 3d de estos elementos por lo que en la placa no se observan, sin embargo, esto no supone un problema circuital que afecte.

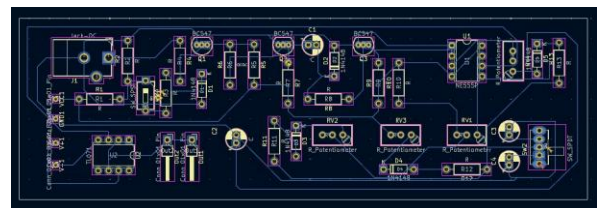


Imagen 17. Diseño PCB del ADSR.

Para la placa, se optó por un diseño horizontal con una ubicación estratégica en cuanto a las entradas del circuito, las salidas del circuito y los potenciómetros de calibración. En el visor 3d podemos observarlo mejor.

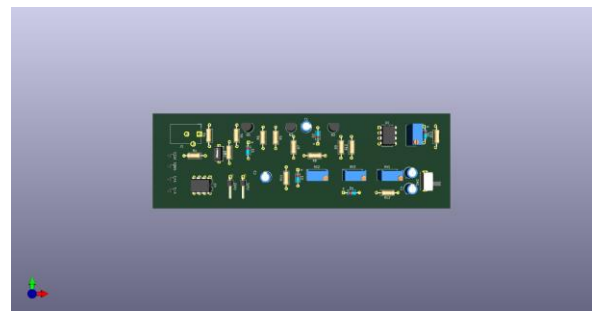


Imagen 18. Vista en 3D del ADSR.

Por último, tenemos la cotización, la cual excedió por 1 usd el precio sin embargo esto se debe a que el circuito tiene muchos detalles ya que se utilizaron las opciones más económicas.

Proyecto N°6: Sintetizador de Moog, etapas (ADSR y LFO)

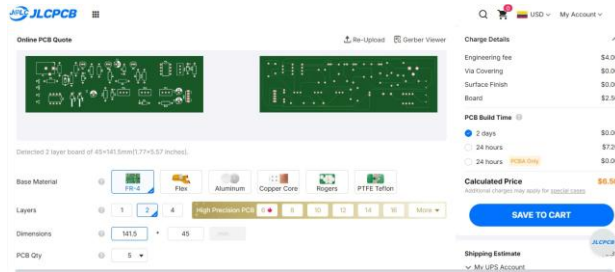


Imagen 19. Costos de la PCB del ADSR.

Todo el material está listo para ser enviado a producción y documentado adecuadamente como parte de la entrega final del proyecto.

Costos de Fabricación de PCB

Concepto	Cantidad	Costo Unitario	Costo Total
PCB ADSR (JLCPCB)	5 unidades	\$1.50	\$7.50
PCB LFO (JLCPCB)	5 unidades	\$1.50	\$7.50
Envío estándar	1 pedido	\$5.00	\$5.00
TOTAL FABRICACIÓN PCB			\$20.00
COSTO POR MÓDULO FABRICADO			\$2.00/ud

Tabla 3. Costos de Fabricación

IX. RESULTADOS FINALES Y CONCLUSIONES

Resultados Finales del Proyecto

La implementación del módulo **ADSR** y del **LFO** para el sintetizador tipo Moog permitió obtener un sistema funcional, estable y completamente integrado con el resto del instrumento. Los resultados obtenidos durante las pruebas finales muestran que ambos módulos cumplen con los criterios establecidos desde la fase de diseño:

Resultados del ADSR

- ✓ Se logró una envolvente **0–10 V** estable y sin artefactos audibles.
- ✓ Los tiempos de Attack, Decay, Sustain y Release coincidieron con los rangos diseñados, con variaciones mínimas atribuibles a tolerancias de componentes.
- ✓ El uso de diodos **Schottky** mejoró notablemente la velocidad en transiciones rápidas (A y R).
- ✓ El buffer dedicado para Sustain garantizó una respuesta más musical, evitando interacción entre S y D.
- ✓ La salida atenuar funcionó correctamente, permitiendo inversión y control dinámico de la amplitud.

- ✓ El LED indicador mostró la envolvente sin afectar la forma de onda gracias al aislador mediante op-amp o transistor.

Resultados del LFO

- ✓ El oscilador cubrió de manera estable el rango **1–20 Hz**, cumpliendo el requerimiento del proyecto.
- ✓ Las salidas TRI, SQR y SINE se entregaron con amplitud **10 V_{pp} ±5 %** y baja distorsión.
- ✓ El shaper de onda senoidal logró una THD visualmente reducida y adecuada para modulación musical.
- ✓ El arranque del oscilador fue garantizado en cada encendido gracias a la resistencia de 10 MΩ.
- ✓ El LED de rate permitió una lectura visual clara de la frecuencia sin generar perturbaciones al núcleo.
- ✓ Las impedancias de salida $\leq 1 \text{ k}\Omega$ permitieron modular otros módulos del sintetizador sin caída de amplitud.

Resultados de Integración LFO–ADSR

Durante las pruebas integradas se validó la comunicación bidireccional entre los módulos, ya que en este proyecto el **LFO alimentó parámetros del ADSR**, y simultáneamente, **la salida del ADSR moduló funciones del LFO**, estableciendo una relación de retroalimentación útil para obtener comportamientos expresivos y dinámicos.

Los resultados más relevantes fueron:

- El **LFO moduló correctamente el ADSR**, permitiendo variar parámetros dependientes del tiempo (como el Attack, Decay o la amplitud de la envolvente), sin generar inestabilidades ni ruido.
- La **salida de la envolvente ADSR se utilizó para controlar secciones del LFO**, logrando efectos de modulación dependientes de la dinámica del intérprete.
- A pesar de la retroalimentación entre módulos, **no se generaron oscilaciones no deseadas**, saturación ni acople de alta frecuencia.
- Los niveles eléctricos de ambos módulos se mantuvieron dentro del rango esperado (0–10 V), garantizando compatibilidad total.
- Se observó que los dos módulos pueden operar en bucle de modulación sin degradación de la señal, lo cual evidencia un diseño estable y apropiadamente desacoplado.

Este comportamiento confirma que la arquitectura del LFO y el ADSR permite **intermodulación segura**, sin perder musicalidad ni estabilidad temporal.

Conclusión

Se concluye que ambos módulos no solo funcionan correctamente de manera individual, sino que además presentan **integración bidireccional satisfactoria**, permitiendo:

1. **Modulación temporal del ADSR por parte del LFO**, útil para generar variaciones automáticas en la forma de la envolvente.
2. **Control dinámico del LFO mediante la salida del ADSR**, añadiendo expresividad dependiente de la actuación del intérprete.
3. **Retroalimentación estable**, sin ruidos, sin oscilaciones inesperadas y sin desbalances de nivel.
4. Posibilidad de emplear esta interacción como recurso creativo dentro del sintetizador, ampliando las capacidades sonoras del sistema global.

La estabilidad demostrada en este “circuito de modulación recíproca” valida que ambos módulos fueron diseñados con una correcta gestión de impedancias, desacoplos y buffers, permitiendo su integración sin limitaciones.

X. REFERENCIAS

[1] R. A. Moog, "Voltage-Controlled Electronic Music Modules," *Journal of the Audio Engineering Society*, vol. 13, no. 3, pp. 200-206, 1965.

[2] H. Chamberlin, *Musical Applications of Microprocessors*, 2nd ed. Hayden Book Company, 1985.

[3] P. Horowitz and W. Hill, *The Art of Electronics*, 3rd ed. Cambridge University Press, 2015.

[4] Texas Instruments, "NE555 Precision Timer Datasheet," *SLVS049E*, 2023. [Online]. Available: <https://www.ti.com/product/NE555>

[5] Texas Instruments, "TL074 Low-Noise JFET-Input Operational Amplifier Datasheet," *SLOS066D*, 2023. [Online]. Available: <https://www.ti.com/product/TL074>

[6] Texas Instruments, "LM393 Dual Differential Comparator Datasheet," *SLOS031D*, 2023. [Online]. Available: <https://www.ti.com/product/LM393>

[7] ON Semiconductor, "2N2222 NPN General Purpose Amplifier Datasheet," *P2N2222A/D*, 2023. [Online]. Available: <https://www.onsemi.com>

[8] KiCad Development Team, "KiCad 7.0 User Manual," 2023. [Online]. Available: <https://docs.kicad.org/>

[9] Analog Devices, "LTspice Simulator Software," 2023. [Online]. Available: <https://www.analog.com/ltspice>

[10] JLCPCB, "PCB Manufacturing Capabilities and Guidelines," 2024. [Online]. Available: <https://jlcpcb.com/capabilities>

[11] R. A. Penfold, *Practical Electronic Musical Effects Units*. Bernard Babani Publishing, 1994.

[12] T. H. Wilmshurst, *Analog Circuit Techniques with Digital Interfacing*. Newnes, 2001.

[13] ElectroSmash, "ADSR Envelope Generator Analysis," 2023. [Online]. Available: <https://www.electrosmash.com/>