

Desarrollo

1. Introducción:

Desde su aparición en la década de 1960, los sintetizadores analógicos han representado un hito en la historia de la música electrónica, al permitir la generación de sonidos de forma controlada y completamente electrónica. Aunque el avance de la tecnología digital desplazó temporalmente a los sistemas analógicos, en la actualidad estos han recobrado interés por su calidez sonora, su respuesta continua y su valor pedagógico en el estudio de la electrónica aplicada al audio. Entre los sistemas más emblemáticos se encuentra el sintetizador modular tipo Moog, pionero en la síntesis sustractiva y referencia obligada para el desarrollo de instrumentos electrónicos modernos.

El presente proyecto, titulado “Investigación y análisis para el diseño de un sintetizador analógico modular tipo Moog”, tiene como propósito que los estudiantes apliquen el proceso de diseño en ingeniería para concebir y planificar un sistema electrónico funcional compuesto por módulos interconectados. El trabajo se enfoca en la arquitectura modular del sintetizador, abordando los bloques elementales de generación, modulación, control y salida de audio, con el fin de comprender su interacción y definir los requerimientos técnicos que garanticen la coherencia del sistema.

Durante el desarrollo, el grupo consultará los principios de la síntesis analógica, los estándares de interconexión eléctrica y mecánica, y las características básicas de los módulos VCO (Voltage Controlled Oscillator), VCF (Voltage Controlled Filter), VCA (Voltage Controlled Amplifier) y ADSR (Attack, Decay, Sustain, Release), la experiencia busca no solo comprender el funcionamiento de cada bloque, sino también promover el trabajo colaborativo mediante la división del sistema en cuatro grupos temáticos, según el grado de complejidad técnica de los módulos.

2. Investigación y Análisis de Antecedentes:

2.1. Principios de funcionamiento de un sintetizador analógico

Un sintetizador analógico es un sistema electrónico diseñado para generar y modelar señales eléctricas que representan sonidos audibles. Su principio fundamental se basa en la síntesis sustractiva, técnica en la que se parte de una señal rica en armónicos producida por un oscilador y, mediante filtros y controladores, se eliminan o atenúan determinadas frecuencias para dar forma al timbre final.

A diferencia de los sistemas digitales, en los sintetizadores analógicos las señales se procesan de manera continua, lo que les confiere una respuesta suave y características sonoras apreciadas por músicos y productores. Los parámetros como frecuencia, amplitud y timbre se controlan mediante tensiones variables (CV, Control Voltage), lo que permite modular el sonido en tiempo real.

Cada módulo cumple una función específica dentro del flujo de señal: la generación de tonos (VCO), el filtrado de frecuencias (VCF), el control de amplitud (VCA) y la definición temporal del sonido (ADSR). La interacción de estos bloques, junto con fuentes de modulación y control externo (LFO, teclado CV/gate), conforma la esencia del proceso de síntesis analógica.

2.2. Arquitectura modular: bloques funcionales típicos (VCO, VCF, VCA, ADSR, Mixer)

El sintetizador modular se compone de **bloques independientes interconectables**, cada uno con entradas y salidas de señal y control. Esta arquitectura ofrece **flexibilidad y creatividad** al permitir al usuario definir sus propias rutas de señal (“patches”).

Los bloques principales son:

VCO (Voltage Controlled Oscillator): genera ondas básicas (senoidal, cuadrada, triangular, diente de sierra) cuya frecuencia depende de una tensión de control. Es el núcleo sonoro del sistema.

VCF (Voltage Controlled Filter): atenúa o resalta componentes del espectro armónico. El filtro paso-bajo tipo *Moog ladder* es el más característico, aportando el timbre cálido distintivo de estos sintetizadores.

VCA (Voltage Controlled Amplifier): regula la amplitud de la señal de audio según una tensión de control, usualmente proveniente de una envolvente ADSR.

ADSR (Attack, Decay, Sustain, Release): define cómo evoluciona la amplitud del sonido en el tiempo, desde el ataque inicial hasta su desaparición.

Mixer: permite combinar señales de distintos VCO o fuentes de ruido, ajustando niveles antes de enviarlas al filtro o a la salida.

Estos módulos se interconectan a través de **tensiones de control (CV)** y señales de **gate/trigger**, estableciendo una estructura lógica que imita el comportamiento de los instrumentos acústicos, pero con infinitas posibilidades de modulación.

2.3 Ejemplos o referentes técnicos:

En esta sección se presentan dos referentes técnicos relevantes para nuestro proyecto: un trabajo académico de diseño de un sintetizador analógico modular, y un kit comercial de síntesis analógica semimodular. Ambos aportan ideas, criterios de diseño y tecnologías que podemos adoptar o adaptar para nuestro sistema.

2.3.1 Trabajo académico “Diseño e implementación de un sintetizador analógico modular”

Se toma como referencia el documento de Diseño e implementación de un sintetizador analógico modular (Universidad Politécnica de Madrid) que detalla el proceso de diseño, implementación y puesta en marcha de un sintetizador analógico modular desde cero.

[UPM OA+1](#)

Entre los aspectos destacados de este trabajo están:

La definición de módulos independientes (VCO, VCF, VCA, ADSR, etc.) que pueden interconectarse entre sí, lo cual coincide con nuestra propuesta modular. [UPM OA](#)

La consideración de factores de calibración de la escala 1 V/octava, y normativa de tensiones de control (CV), que son de interés para asegurar una afinación precisa en un sintetizador modular. [UPM OA+1](#)

La documentación de la arquitectura general, la distribución de módulos y la planificación del montaje físico, lo que nos aporta un referente de metodología para nuestra fase de planificación.

2.3.2 Kit comercial Moog MAVIS

Como complemento, tomamos como ejemplo el kit comercial semi modular Moog Mavis (build-it-yourself). Este kit ofrece un sintetizador analógico con módulos integrados,

interfaz de patch-bay, VCO, filtro tipo escalera, ADSR y conectividad eurorack.
Sweetwater+2perfectcircuit.com+2

Algunos puntos aplicables a nuestro proyecto son:

Su integración de varias funciones (oscilador, filtro, VCA, envolvente) en un solo módulo con interfaz de patch, lo que ilustra cómo se puede optimizar espacio y mantener modularidad.

La implementación del filtro escalera de 4 polos de -24 dB, característica clásica “tipo Moog”, lo que refuerza la elección de un estilo de timbre que buscamos emular. [Sweetwater](#)

2.4. Componentes y tecnologías disponibles

El desarrollo de sintetizadores analógicos modernos se apoya en una combinación de **componentes discretos y circuitos integrados**.

Entre los componentes más empleados se encuentran:

Transistores bipolares (2N2222, 2N3904): empleados en pares diferenciales, exponentiadores y etapas de ganancia.

Amplificadores operacionales (TL072, LM741, LM358): usados en integradores, buffers y mezcladores.

OTAs (Operational Transconductance Amplifiers, LM13700): base de los módulos VCA y VCF por su capacidad de control de ganancia mediante corriente.

NE555: útil para generadores de envolvente o temporizadores simples.

Reguladores de voltaje (LM78XX, LM79XX): proporcionan fuentes estables de ± 12 V o ± 15 V, importantes para la correcta operación analógica.

El diseño de cada módulo debe considerar la compatibilidad de niveles de señal (CV de ± 5 V típicamente)

2.5. Consideraciones prácticas: alimentación, niveles de señal, conectores, interfaz y seguridad

El correcto funcionamiento del sintetizador modular requiere una **alimentación simétrica y estable**, generalmente de **± 12 V o ± 15 V**, con baja ondulación y capacidad de corriente

suficiente para alimentar varios módulos simultáneamente. Cada módulo debe incorporar filtros de desacoplo (condensadores electrolíticos y cerámicos) para evitar interferencias entre secciones.

Los **niveles de señal** más comunes son:

Señales de audio: ± 5 V pico a pico.

Tensiones de control (CV): 0–10 V o ± 5 V según la norma.

Señales de *gate/trigger*: 0–5 V o 0–10 V.

En cuanto a **interconexión**, se suelen emplear conectores **jack de 3,5 mm o $\frac{1}{4}$ de pulgada**, manteniendo independencia entre señales de audio y control.

Desde el punto de vista mecánico, los módulos pueden montarse en bastidores estándar tipo **Eurorack** o **5U**, garantizando compatibilidad y expansión futura.

Finalmente, las **consideraciones de seguridad** incluyen el uso de fuentes con protección térmica, conexiones a tierra adecuadas, y el aislamiento eléctrico entre etapas de potencia y señal. Además, se recomienda la inclusión de fusibles y protección contra polaridad inversa para evitar daños en los módulos.

3. Definición de Requerimientos

La definición de requerimientos tiene como propósito establecer las condiciones técnicas, funcionales, mecánicas y estéticas que orientarán el diseño del sintetizador analógico modular. Estos requerimientos fueron definidos de manera colaborativa por los cuatro equipos de trabajo, considerando tanto los referentes técnicos analizados como la viabilidad de construcción y posterior integración de los módulos.

3.1. Requerimientos globales del sistema

a) Requerimientos eléctricos

Tensiones de alimentación:

El sistema operará con una fuente simétrica de ± 5 V.

Se considerará también una **fuente externa de 12 V DC** como alternativa, con el objetivo de comparar desempeño, estabilidad y ruido entre ambas opciones durante la fase experimental.

Impedancias:

Entradas con **alta impedancia ($\geq 100 \text{ k}\Omega$)** para minimizar carga sobre las fuentes de señal.

Salidas con **baja impedancia ($\leq 1 \text{ k}\Omega$)** para asegurar compatibilidad con otros módulos.

Niveles de señal y control:

Control de voltaje estándar: **1 V/octava**.

Rango de señales de audio: **$\pm 5 \text{ V pico a pico}$** típicamente.

Señales de control (CV y Gate): **0 – 10 V** o **$\pm 5 \text{ V}$** según módulo.

Topología de alimentación:

Distribución en **estrella** para reducir interferencias y caídas de voltaje.

Cada módulo incluirá **filtros de desacoplo RC** y condensadores locales de 100 nF y 10 μF .

b) Requerimientos funcionales

Tipos de señal:

El sistema procesará señales **analógicas de audio** (hasta 20 kHz) en formas de onda **cuadrada, triangular, diente de sierra y PWM**.

Rangos de operación:

VCO: desde unos pocos Hz hasta **20 kHz**.

LFO: hasta **20 Hz**.

VCF: frecuencia de corte variable dentro del rango audible.

Control por voltaje:

Los módulos principales (**VCO, VCF y VCA**) deben responder a control de voltaje con precisión lineal o exponencial, manteniendo coherencia con la escala 1 V/octava.

Relación entre módulos:

Interconectividad total entre módulos mediante señales de **CV** y **Gate**, garantizando compatibilidad eléctrica y funcional entre:

VCO \leftrightarrow VCF \leftrightarrow VCA \leftrightarrow ADSR \leftrightarrow LFO \leftrightarrow Mixer(Integrado)

c) Requerimientos mecánicos

Dimensiones de los módulos:

Altura: 128 mm (formato **Eurorack de 2 RU**).

Ancho: 25 mm (2.5 cm) o 50 mm (5 cm) según complejidad del módulo.

Montaje:

Los módulos se fijarán en un **chasis o rack metálico** de 2 RU mediante tornillos o escuadras, asegurando rigidez estructural.

Conectores:

Tipo **minijack de 3.5 mm**, estándar **Eurorack (Doepfer)**.

Espaciado mínimo entre conectores: **5 mm**.

Masa común conectada al chasis para apantallamiento y reducción de ruido.

Componentes físicos:

Potenciómetros con vástago de **7 mm** y separación mínima de **15 mm**.

Perillas tipo **D-shape** o estándar de 10 mm.

d) Requerimientos estéticos y ergonómicos

Diseño del panel frontal:

Fabricado en aluminio o material rígido, con distribución jerárquica de elementos:

Controles y potenciómetros en la parte superior.

Entradas y salidas en la parte inferior.

Ergonomía y usabilidad:

Espaciado suficiente entre controles para evitar interferencias físicas al operar.

Identificación legible de cada función mediante serigrafía o grabado.

Coherencia visual entre módulos (tipografía, color, disposición).

e) Requerimientos de integración:

Compatibilidad eléctrica:

Todos los módulos compartirán el mismo bus de alimentación (± 5 V, GND) y niveles

estándar de señal y control.

Compatibilidad mecánica:

Montaje en un mismo bastidor con **alineación de altura y separación**.

Estructura modular:

Cada módulo debe poder operar de forma **independiente**, pero también ser **interconectable** con los demás sin recalibraciones.

Distribución recomendada:

Colocar módulos de función correlativa próximos entre sí (**VCO–VCF–VCA–ADSR**) para reducir interferencias electromagnéticas y longitudes de cableado.

3.2. Criterios de evaluación y validación de cada requerimiento

Tipo de requerimiento	Descripción / Especificación	Justificación técnica	Criterio de aceptación / validación
Eléctrico	Fuente simétrica ± 5 V	Asegura compatibilidad con estándares de sintetizadores modulares	La tensión se mantiene dentro del $\pm 5\%$ durante carga total
Eléctrico	Entradas ≥ 100 k Ω / Salidas ≤ 1 k Ω	Impide pérdida de señal y asegura adaptación de impedancias	Medición con multímetro confirma valores de impedancia
Funcional	Control por voltaje 1 V/octava	Estándar internacional (Moog, Eurorack)	Desviación $\leq 1\%$ por octava
Funcional	Rango VCO: 1 Hz–20 kHz	Cobertura completa del espectro audible	Osciloscopio confirma rango
Mecánico	Altura 128 mm, ancho 25–50 mm	Compatibilidad Eurorack	Ajuste físico en bastidor
Mecánico	Conectores jack 3.5 mm con masa común	Reduce interferencias	Ruido < -60 dBFS en medición

Ergonómico	Controles superiores, conectores inferiores	Facilita operación y legibilidad	Evaluación por usuario / prueba de manejo
Integración	Interconexión estándar CV/gate ± 5 V	Garantiza compatibilidad total entre módulos	Verificación en prueba de patching completa

4. Generación y Selección de Conceptos

El sistema propuesto consiste en un sintetizador analógico modular de arquitectura sustractiva, compuesto por cinco módulos fundamentales:

1. **VCO (Voltage Controlled Oscillator)** — generador principal de señal.
2. **VCF (Voltage Controlled Filter)** — modelador del espectro armónico.
3. **VCA (Voltage Controlled Amplifier)** — control dinámico de amplitud.
4. **EG / ADSR (Envelope Generator)** — generador de envolvente temporal.
5. **LFO (Low Frequency Oscillator)** — fuente de modulación periódica.

Cada módulo será **independiente pero interconectable**, permitiendo su uso individual o combinado en distintas configuraciones.

El sintetizador adoptará un formato modular tipo Eurorack de 2 RU (128 mm), con alimentación común de ± 5 V y conectores minijack de 3.5 mm para señal y control, el principio de funcionamiento se basa en la síntesis sustractiva clásica: un oscilador genera una señal rica en armónicos, que luego se filtra, se modula en amplitud y finalmente se envía a salida de audio.

Como complemento se incluye una salida de audio activa, implementada mediante un parlante Mini Speaker USB de PC, el cual integra internamente un amplificador de potencia y control de volumen, esta decisión permite prescindir de una etapa adicional de amplificación, simplificando el diseño electrónico y reduciendo el consumo del sistema.

4.2. Alternativas de diseño de bloques y selección de arquitectura de referencia y justificación técnica:

Para el VCO:

Los diseños de osciladores controlados por voltaje (VCO) basados en el LM13700 (páginas 19 y 20 del datasheet) son capaces de generar diversas formas de onda (triangular/cuadrada, rampa y senoidal) variando su frecuencia de oscilación mediante una corriente de control.

Originalmente, estos esquemas operan con una alimentación simétrica de 15 V, lo cual asegura el rango dinámico óptimo del amplificador de transconductancia y una baja distorsión de la señal. Sin embargo, el presente proyecto requiere adaptar estos circuitos a una alimentación de 5 V para conseguir un bajo consumo y compatibilidad directa con sistemas digitales y microcontroladores.

Esta modificación de voltaje implica la necesidad de recalcular todos los valores de resistencias y capacitores en cada diseño. El objetivo de este recálculo es garantizar que la frecuencia de oscilación y la forma de onda deseadas se mantengan inalteradas dentro del nuevo y reducido rango de tensión.

Oscilador triangular y cuadrado:

Este diseño se eligió por su simplicidad y versatilidad, dado que permite generar simultáneamente señales triangulares y cuadradas a partir de un circuito que combina un integrador controlado por corriente y un comparador. El LM13700 facilita un ajuste lineal de la frecuencia al regular la pendiente de integración directamente mediante la corriente de control. Esta característica lo convierte en una solución ideal para aplicaciones como pruebas de modulación, generadores de funciones o sistemas de síntesis.

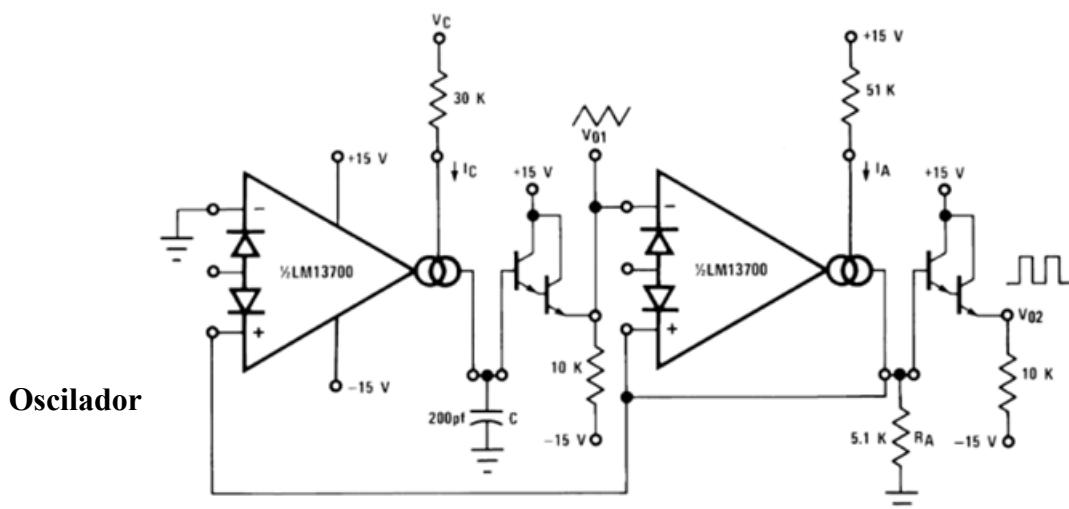
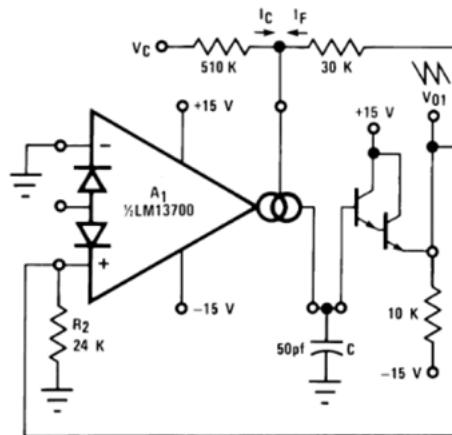


Figura 1. Oscilador triangular y cuadrado.

Este circuito se eligió por su capacidad de generar una señal con crecimiento o decrecimiento lineal (rampa), lo que resulta fundamental en sistemas de barrido o temporización. La corriente controlada del LM13700 determina la velocidad de carga del capacitor, estableciendo así directamente la pendiente y la frecuencia de la rampa. Para su adaptación a 5v, será necesario ajustar el capacitor de integración y las resistencias de descarga con el fin de asegurar que se conserve la linealidad del barrido dentro del nuevo rango de tensión.



Oscilador sinusoidal:

Figura 2. Oscilador diente de sierra.

Este diseño se justifica por su capacidad de generar una señal de baja distorsión gracias al uso de los diodos de linealización del LM13700. Su configuración, que actúa como un oscilador senoidal o de realimentación RC, lo hace especialmente adecuado para aplicaciones en el ámbito de audio o modulación FM. La reducción de la tensión de alimentación a 5v requerirá un nuevo dimensionamiento de los componentes pasivos para garantizar la amplitud deseada y la estabilidad general de la señal de salida.

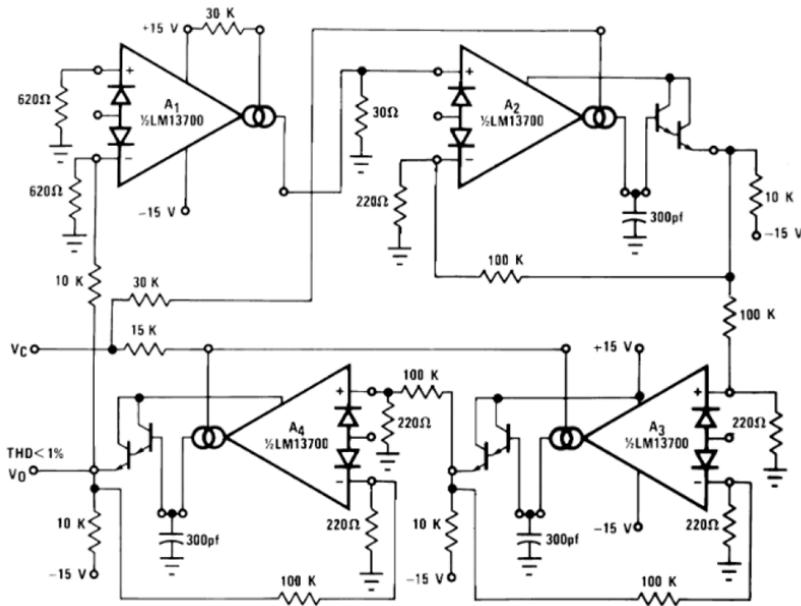


Figura 3. Oscilador sinusoidal.

Para el VCF:

Opción 1: Filtro Controlado por Voltaje tipo Steiner-Parker (VCF Multimodo)

Descripción general

El filtro controlado por voltaje (VCF) es una de las etapas fundamentales del sintetizador, ya que permite modificar el contenido espectral de la señal generada por el VCO. Se propone como alternativa principal el diseño de un **filtro multimodo tipo Steiner-Parker**, debido a su capacidad de ofrecer tres modos de operación pasa-bajos, pasa-banda y pasa-altos utilizando una única topología (ver **Figuras 1 y 2**)

Este tipo de filtro, derivado del clásico **Synthacon VCF**, emplea una red RC activa en la que las resistencias son reemplazadas por diodos y transistores que actúan como resistencias dependientes de la corriente. De esta manera, la **frecuencia de corte (fc)** se controla mediante la **corriente aplicada a los elementos activos**, logrando la variación dinámica del filtro en función de una señal de control de voltaje (CV).

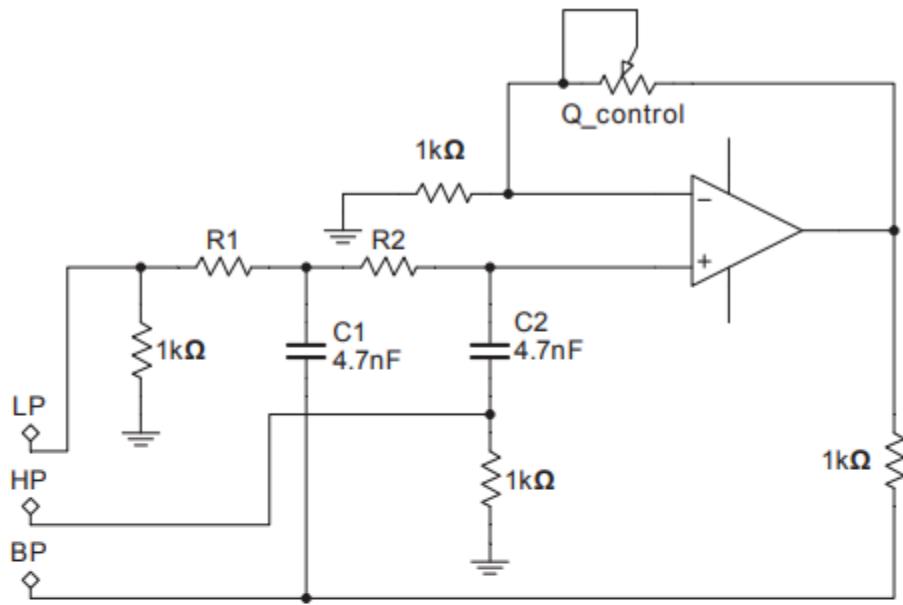


Figura 4. Filtro multimodo básico.

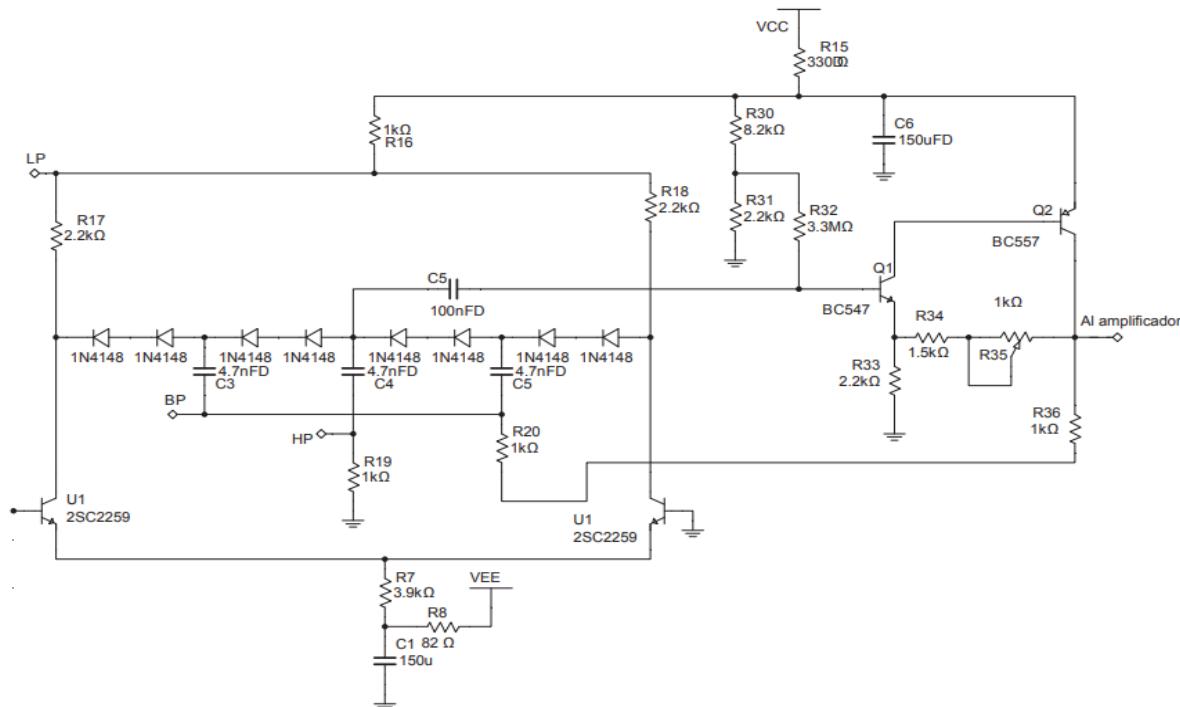


Figura 5. Filtro Steiner.

Estructura del circuito

El circuito básico se compone de tres etapas principales:

1. **Red de filtrado activa RC:** constituida por tres secciones de integración RC con sus correspondientes tomas de salida. Cada una permite obtener un modo de respuesta distinto (LP, BP o HP).
2. **Etapa de control de frecuencia:** formada por un par diferencial de transistores (BJT) y un conjunto de diodos que regulan la resistencia efectiva en las ramas del filtro. Esta sección recibe la tensión de control (CV) proveniente de fuentes internas o externas (ADSR, LFO, o señal de control interna), como se observa en las **Figuras 3 y 4**
3. **Etapa de realimentación (resonancia o Q):** implementada mediante un amplificador operacional (TL074) que introduce una cantidad controlada de la salida del filtro de nuevo a la entrada, permitiendo ajustar la resonancia y enfatizar frecuencias cercanas a la f_c .

Los valores típicos de los componentes seleccionados, según la tabla del proyecto, son $\mathbf{R = 1 k\Omega}$ y $\mathbf{C = 4.7 nF}$, lo que permite un rango de operación adecuado para señales de audio analógicas (ver **Tabla 1**)

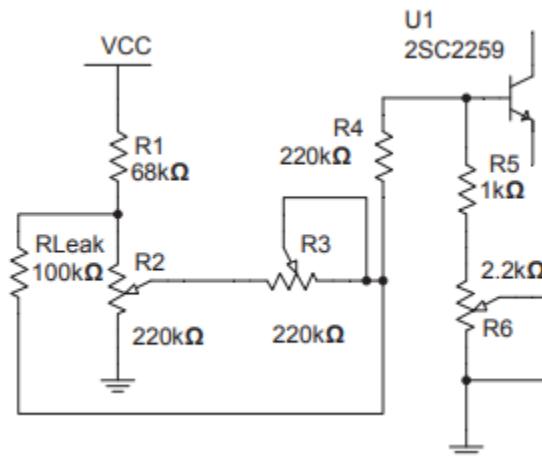


Figura 6. Entrada de control interna.

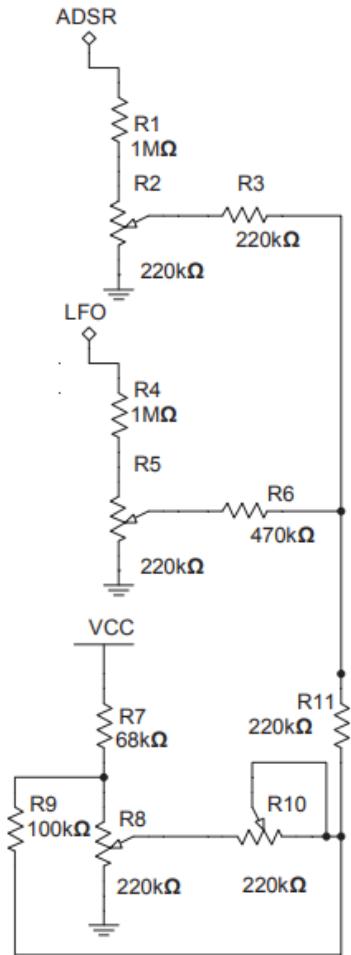


Figura 7. Entrada de control (ADSR, LFO e interna).

V_b [mV]	f_c [Hz]	V_b [V]	f_c [Hz]
22,774	100	36,711	10000
24,003	200	37,178	11000
26,041	500	37,553	12000
27,629	1000	37,810	13000
29,539	2000	38,021	14000
30,926	3000	38,207	15000
32,079	4000	38,325	16000
33,118	5000	38,461	17000
34,068	6000	38,535	18000
34,887	7000	38,629	19000
35,636	8000	38,723	20000
36,219	9000		

Tabla 1. Pares tensión en base – f_c para el transistor BC547

Funcionamiento

La tensión de control aplicada al bloque VCF se convierte en una corriente proporcional que atraviesa los diodos o transistores del filtro, modificando su resistencia dinámica y, por tanto, la frecuencia de corte.

El documento muestra la relación entre el **voltaje base (Vb)** y la **frecuencia de corte (fc)** para diferentes puntos de control, demostrando una variación de la frecuencia de corte entre ≈ 100 Hz (para 22.7 mV) y ≈ 20 kHz (para 38.7 mV), según los cálculos experimentales realizados con el transistor BC547

Esta característica permite que la frecuencia del filtro varíe suavemente con la modulación externa, logrando efectos típicos de barrido (sweep) o vibrato, esenciales en la síntesis sustractiva analógica.

Ventajas:

Multimodo: ofrece tres tipos de respuesta (LP, BP, HP) a partir del mismo núcleo de circuito.

Carácter sonoro analógico: el uso de componentes discretos genera una ligera saturación armónica que aporta calidez al sonido.

Integración sencilla: utiliza transistores, diodos y amplificadores operacionales comunes (TL074, BC547, 1N4148), coherentes con el resto del diseño del sintetizador.

Compatibilidad con modulación externa: permite ser controlado por voltajes provenientes de otras etapas (ADSR, LFO, señal interna del VCO).

Desventajas:

No linealidad: la relación entre la tensión de control y la frecuencia de corte no es completamente lineal, lo que dificulta un control matemático exacto.

Sensibilidad térmica: los transistores y diodos requieren cierto emparejamiento o compensación térmica para evitar desviaciones en la fc.

Ajuste de calibración: necesita una calibración cuidadosa para mantener el comportamiento deseado a lo largo del rango de frecuencias.

Aplicación y justificación dentro del proyecto:

Este diseño fue **seleccionado como el VCF principal** del sintetizador modular descrito en el proyecto, ya que combina **flexibilidad tonal, simplicidad de implementación y carácter sonoro clásico**. Su arquitectura permite integrar entradas de modulación múltiple y mantener coherencia con las demás etapas analógicas (VCO, VCA y generadores de envolvente).

El autor destaca que, aunque existen opciones más precisas (como los filtros basados en OTA o en topología Deliyannis), el **VCF tipo Steiner-Parker** ofrece la mejor combinación

entre funcionalidad y estética sonora para un sintetizador analógico experimental, justificando su elección final.

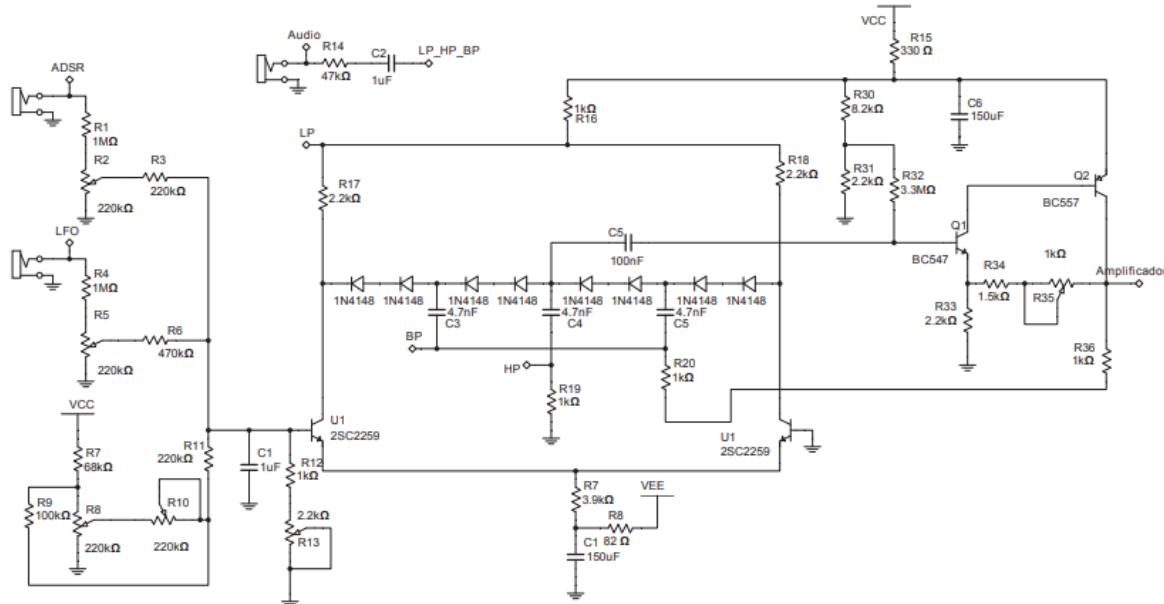


Figura 8. Esquema final del módulo VCF (parte 1).

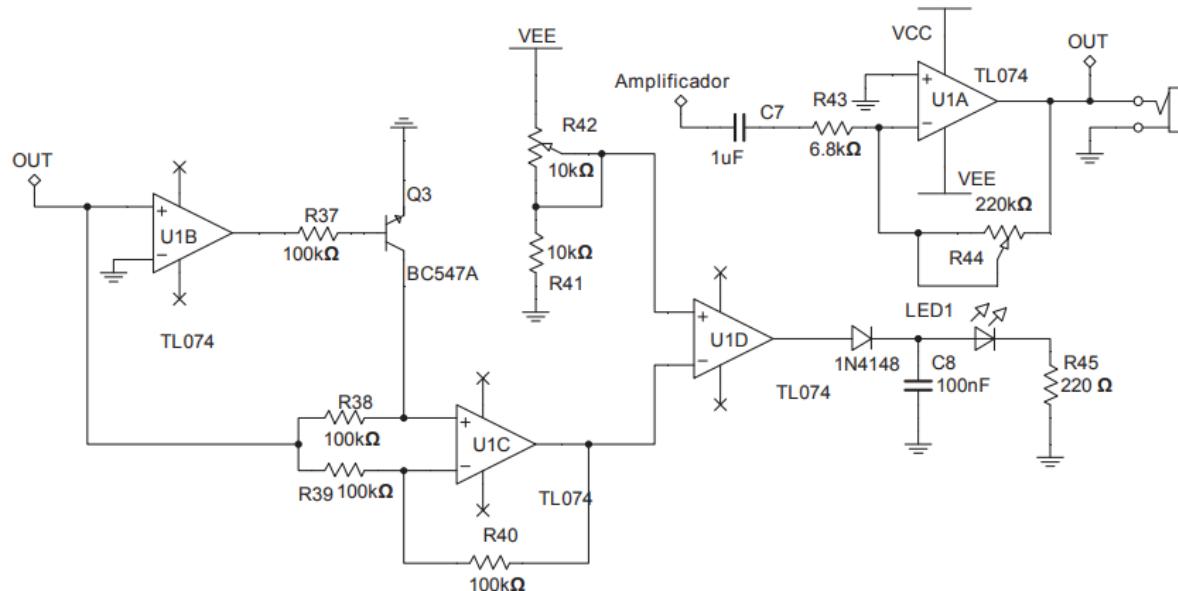


Figura 9. Esquema final del módulo VCF (parte 2).

Opción 2: Filtro Controlado por Voltaje Basado en OTA (LM13700)

Descripción general

El **filtro controlado por voltaje basado en OTA** (Operational Transconductance Amplifier) es una alternativa moderna y altamente precisa al diseño tradicional con transistores discretos. En este enfoque, el control de la frecuencia de corte se realiza **variando la transconductancia (g_m)** del amplificador OTA, que depende directamente de una **corriente de control (I_{ABC})** aplicada a sus terminales.

El componente más utilizado en esta categoría es el **LM13700**, un circuito integrado de bajo costo que contiene dos amplificadores de transconductancia y buffers de salida. Este tipo de filtro permite **controlar la frecuencia de corte mediante voltajes lineales o exponenciales**, según la forma en que se diseñe el convertidor de control.

El **VCF OTA** es ideal para sistemas que requieren **mayor estabilidad térmica, precisión de control y respuesta más lineal** entre la tensión de control (CV) y la frecuencia resultante. Se usa ampliamente en sintetizadores profesionales, por ejemplo, en los **Oberheim OB-X, Roland Jupiter y ARP Odyssey**, entre otros.

([Texas Instruments – LM13700 Dual Operational Transconductance Amplifier, Datasheet, 2019](#))

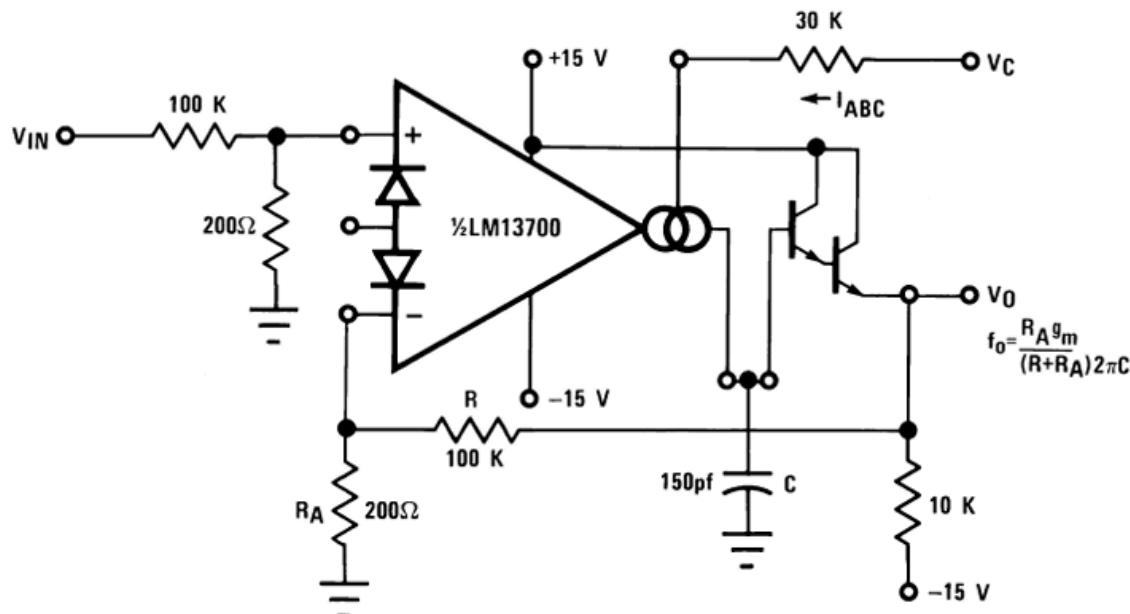


Figura 10. Filtro de paso bajo controlado por voltaje.

Estructura del circuito

El circuito básico de un VCF OTA tipo pasa-bajos de 2º orden se compone de las siguientes secciones:

1. Etapa de entrada de señal (Vin):

La señal de audio proveniente del VCO se acopla a través de un capacitor y se introduce a un integrador controlado por un OTA.

Cada integrador del filtro se forma con un **LM13700**, un capacitor de integración y un resistor de realimentación.

2. Etapa de control de transconductancia:

La frecuencia de corte (f_c) se determina mediante la corriente I_{abc} que controla la transconductancia g_m de los OTAs, siguiendo la relación:

$$f_c = g_m / 2\pi C$$

Como $g_m \propto I_{abc}$, basta con variar la corriente de control (derivada del voltaje CV) para desplazar la frecuencia de corte de manera lineal.

3. Etapa de realimentación (resonancia o Q):

Similar al filtro Steiner, se agrega una realimentación positiva con un amplificador operacional (por ejemplo, **TL074** o **LM324**) que permite controlar la resonancia. Ajustando el factor de realimentación, el filtro puede alcanzar la auto-oscilación.

4. Etapa de salida:

La señal filtrada se toma del segundo integrador (para un pasa-bajos) o de otros puntos intermedios si se desea una salida pasa-banda o pasa-altos.

([Music From Outer Space – VCF Design Using LM13700](#), Ray Wilson, 2012)

Funcionamiento

El principio de funcionamiento del filtro OTA se basa en el hecho de que el amplificador de transconductancia convierte una **tensión de entrada en corriente de salida** proporcional a su transconductancia g_m .

La corriente de control I_{abc} (que depende de la señal de voltaje CV) determina g_m , y por tanto la frecuencia de corte del filtro.

Por ejemplo, en un diseño pasa-bajos de 2 etapas con un solo LM13700 (dos OTAs en un mismo encapsulado), si el condensador de integración es de 3.3 nF y la corriente de control varía de 5 μ A a 500 μ A, la frecuencia de corte puede desplazarse desde unos 100 Hz hasta más de 10 kHz, conservando una respuesta lineal y repetible.

El control de resonancia se implementa sumando una porción ajustable de la salida del filtro a su entrada mediante un potenciómetro o amplificador operacional, lo que realza la amplitud en torno a f_c .

Ventajas:

Linealidad excelente: La relación entre la corriente de control y la frecuencia de corte es prácticamente lineal, lo que facilita calibraciones tipo 1 V/octava.

Estabilidad térmica: Menor sensibilidad a la temperatura que los diseños con BJT y diodos discretos.

Compacto y reproducible: Un solo circuito integrado (LM13700) puede implementar un filtro completo de 2º orden o incluso 4º orden.

Mayor pendiente: Puede lograrse una respuesta de -24 dB/octava utilizando dos integradores en cascada.

Rango amplio de control: Posible variación de $f_c > 100:1$ sin degradación significativa del sonido.

Menor necesidad de ajuste: No requiere emparejamiento de transistores ni compensación térmica compleja.

Desventajas:

Carácter sonoro menos “orgánico”: Produce un sonido más limpio y menos saturado que el de un filtro discreto tipo Steiner.

Necesidad de fuente de corriente precisa: El control CV debe convertirse a corriente ($\text{CV} \rightarrow \text{I}$), lo cual exige un convertidor adicional.

Limitación dinámica: El rango de entrada de señal es más pequeño; una señal demasiado alta puede provocar distorsión o saturación en el OTA.

Dependencia de alimentación simétrica: Generalmente requiere $\pm 12 \text{ V}$ o $\pm 15 \text{ V}$ para operar correctamente.

Aplicación y justificación dentro del proyecto

El diseño OTA se plantea como una **alternativa de precisión** frente al filtro tipo Steiner-Parker. Su implementación es ideal cuando se busca un **control de frecuencia estable, lineal y fácilmente programable**.

En el contexto del proyecto, un VCF basado en OTA podría integrarse en una versión futura del sintetizador modular si se priorizan la estabilidad térmica y la compatibilidad con control digital (p. ej., microcontroladores o conversores DAC). Además, su comportamiento predecible lo hace adecuado para proyectos donde se necesite

repetibilidad y exactitud, como en instrumentos polifónicos o sistemas híbridos analógico-digitales.

No obstante, se descartó como opción principal por su **sonido menos característico** y por el enfoque del proyecto hacia una **estética analógica tradicional**, donde se valora la respuesta no lineal y la “personalidad” del filtro Steiner-Parker.

Selección final y justificación

Se seleccionó la **Opción 1. Filtro tipo Steiner-Parker** como bloque VCF principal del sintetizador modular.

Esta elección es coherente con el enfoque del proyecto, orientado a la construcción de un sintetizador. El diseño permite integrar de forma directa entradas de modulación provenientes de fuentes internas y externas (ADSR, LFO y control interno), sin necesidad de conversores adicionales.

Además, su implementación reutiliza los mismos componentes discretos presentes en otras etapas del sistema (transistores BC547, diodos 1N4148 y amplificadores TL074), lo que simplifica la fabricación y la calibración.

Aunque existen alternativas más lineales y precisas como el filtro basado en OTA (LM13700) el filtro Steiner-Parker ofrece una mayor riqueza armónica y una respuesta sonora más orgánica, cumpliendo con el objetivo principal del diseño: obtener un comportamiento analógico expresivo y musical.

opción 3: filtro Moog

El **filtro Moog**, también conocido como **Moog Ladder Filter**, es un filtro controlado por voltaje (VCF) diseñado por Robert Moog, ampliamente utilizado en los sintetizadores analógicos. Su función principal es modificar el timbre del sonido permitiendo el paso de las frecuencias bajas y atenuando las altas, dependiendo del voltaje de control aplicado. Está conformado por varias etapas que trabajan en conjunto: una **etapa de entrada**, que adapta la amplitud y la impedancia de la señal para evitar distorsiones; una **red en escalera**, compuesta por pares de transistores y capacitores que forman cuatro etapas de filtrado, cada una encargada de reducir progresivamente las frecuencias altas; una **etapa de salida**, que amplifica la señal filtrada; y una **etapa de retroalimentación**, que permite controlar la **resonancia**, es decir, el realce de las frecuencias cercanas al punto de corte. Gracias a esta estructura, el filtro Moog ofrece un sonido cálido, suave y musical, característico de los sintetizadores clásicos.

Esquema del filtro de escalera Moog

En la siguiente imagen vemos como esta conformada la escalera del filtro de Moog, con sus transistores y capacitores:

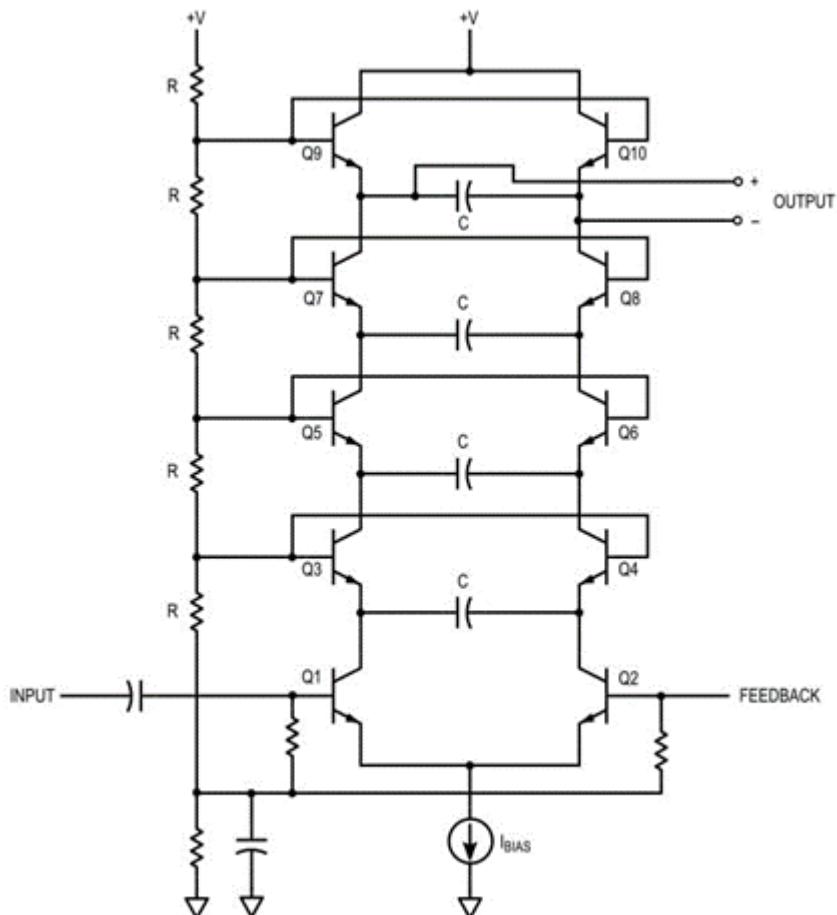


Figura 11. Filtro de escalera.

En este circuito se observan ocho transistores dispuestos en una configuración en escalera. Estos transistores están polarizados mediante un divisor resistivo y controlados por una corriente de polarización o corriente de control, denominada $I_{(bias)}$. La señal de audio se introduce en el transistor Q1, mientras que la retroalimentación encargada de generar la resonancia o “énfasis” en términos de música electrónica se aplica al transistor Q2. Los transistores restantes se encuentran agrupados por pares, compartiendo la misma base y con condensadores conectados en paralelo a sus emisores. La señal de salida se toma como la tensión presente en el condensador ubicado en la parte superior del circuito. Para facilitar el análisis, se puede eliminar (con precaución) la red de polarización, lo que conduce al esquema simplificado mostrado en la Figura 2.

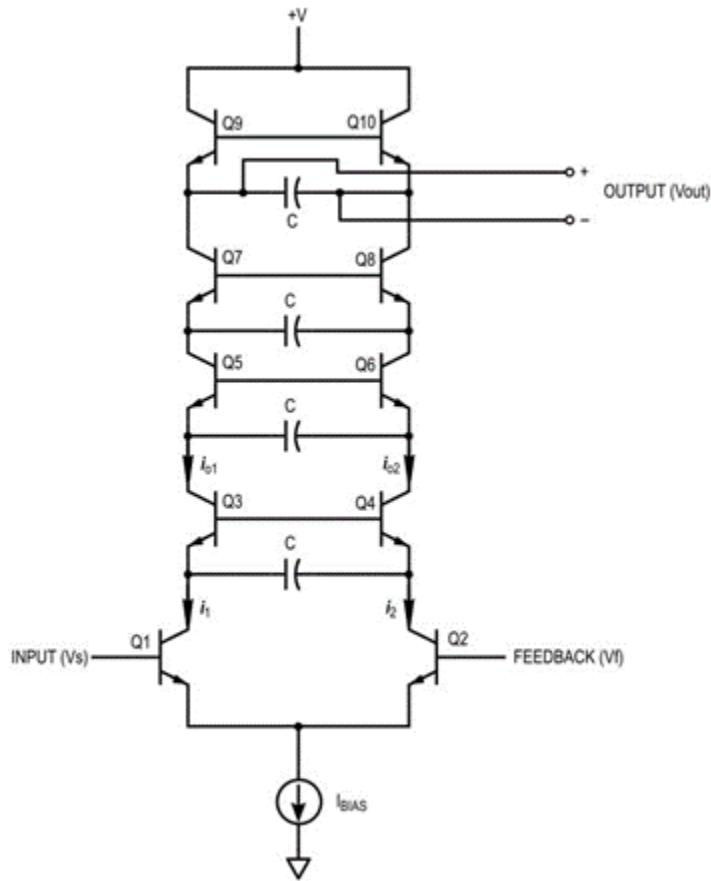


Figura 12. Filtro de escalera simplificado.

Esto puede parecer un poco confuso, ya que las bases no están realmente flotando; en realidad, se mantienen a un potencial fijo gracias a la acción de un divisor de voltaje.

Explicación del filtro de escalera Moog

El circuito controla la frecuencia de corte mediante una corriente denominada I_{bias} , la cual se aplica al par diferencial formado por los transistores Q1 y Q2. Cuando se modifica esta corriente, cambia también la polarización de todos los transistores del circuito, lo que ajusta el comportamiento del filtro.

Si se desprecian las corrientes de base lo cual es válido cuando los transistores tienen una ganancia de corriente (β) muy alta, puede considerarse que toda la corriente continua que pasa por Q1 también circula por la red conectada a su lado, y lo mismo ocurre con Q2 en el lado opuesto. Es decir, el circuito se comporta de forma simétrica, con dos ramas que se equilibran alrededor del par diferencial.

Los pares de transistores (Q3–Q4, Q5–Q6 y Q7–Q8) están formados cada uno por dos transistores y un condensador. En cada par, ambos transistores tienen la misma tensión de base, pero corrientes de emisor diferentes. Estas pequeñas diferencias de corriente hacen que las tensiones base-emisor (V_{be}) no sean iguales, generando así una diferencia de potencial en el condensador.

Esa diferencia depende de la frecuencia, porque la reactancia del condensador cambia con ella. Por tanto, los condensadores actúan como elementos que permiten o bloquean el paso de ciertas frecuencias, produciendo el efecto de filtrado característico del circuito.

En resumen, la corriente I_{bias} controla el punto de operación del circuito y, con ello, la frecuencia de corte del filtro. Los transistores y condensadores trabajan juntos para atenuar o dejar pasar determinadas frecuencias, mientras que la simetría del diseño garantiza un comportamiento estable y predecible.

Ventajas del filtro Moog A continuación, mostramos una tabla con las ventajas que tiene utilizar este tipo de filtros:

Ventajas	Explicación
Sonido cálido y musical	Tiene una respuesta suave y orgánica que define el sonido clásico de los sintetizadores analógicos.
Alta resonancia controlable	Permite un barrido de frecuencias muy expresivo y puede llegar a auto oscilar.
Estabilidad y precisión	El diseño en cascada produce una respuesta predecible y estable.
Implementación clásica	Muy documentado, con muchos ejemplos y componentes disponibles.

Tabla 2. Ventajas.

Desventajas del filtro de Moog

se muestra una tabla con las desventajas que puede tener el uso de este filtro:

Desventajas	Explicación
Solo paso bajo (low-pass)	No ofrece modos paso alto o paso banda como el filtro Steiner o los multimodos modernos.
Complejidad de diseño	Usa muchos transistores emparejados y requiere precisión en los valores.
Sensibilidad térmica	Los transistores pueden variar su comportamiento con la temperatura.
Distorsión si se sobreexcita	Si entra una señal demasiado grande, puede saturarse. Aunque algunos músicos usan esto a propósito.

Tabla 3. Desventajas.

Circuito diseñado

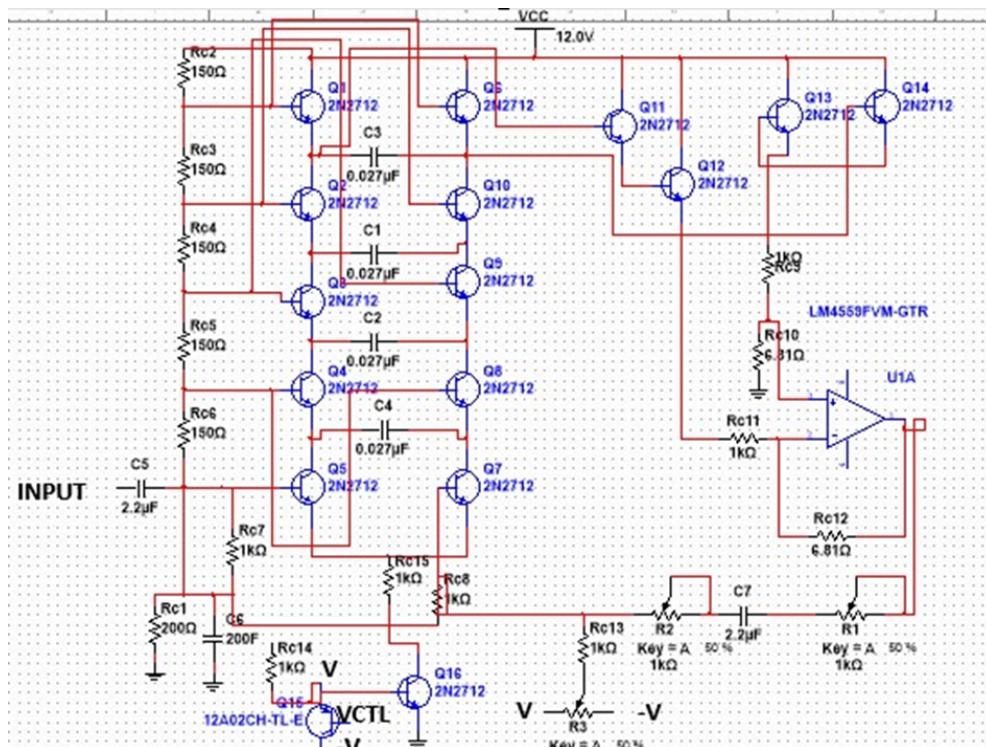


Figura 13. Circuito Propuesto.

¿Por qué usarlo?

Se prefiere usar el **filtro Moog** como VCF porque, a diferencia de otros métodos de filtrado, ofrece una respuesta mucho más **orgánica, cálida y musical**, ideal para la síntesis analógica. Su estructura en **escalera de transistores** permite obtener una caída de 24 dB por octava con una resonancia controlada y estable, lo que lo hace muy versátil para esculpir el timbre del sonido. Además, su sistema de **retroalimentación ajustable** (énfasis) permite realizar las frecuencias cercanas al punto de corte de forma progresiva, generando efectos característicos difíciles de lograr con otros tipos de filtros. Por estas razones, el filtro Moog se prefiere sobre diseños más simples como el Steiner o los filtros de estado variable, ya que combina **estabilidad, calidad sonora y expresividad** en una sola arquitectura.

Para el VCA :

Arquitectura:

El VCA (Amplificador Controlado por Voltaje) es el bloque de un sintetizador encargado de modular la amplitud (volumen) de la señal de audio en función de una señal de control (CV). Así, permite dar dinámica a la salida del sintetizador, como la aplicación de envolventes ADSR o modulaciones por LFO, resultando fundamental para dar expresividad y variación al sonido.

El VCA presentado se basa en un núcleo de par diferencial de transistores (Q1, Q2: BC547BP) responsable de la multiplicación de corriente, junto a un espejo de corriente de salida, procesador de señal de control (OA + diodo ideal + transistores) y amplificador operacional de salida (TL074). Es capaz de recibir múltiples señales de audio y control, mezclar, modular y entregar salida balanceada y ajustable.

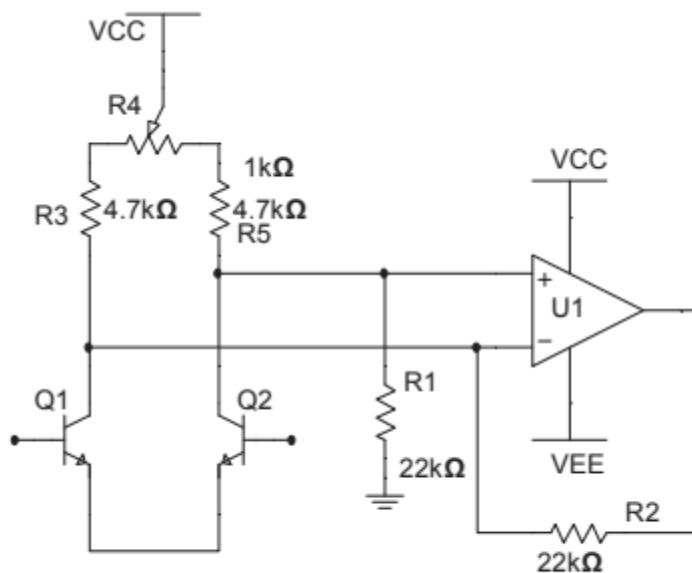


Figura 14. Amplificador diferencial de corriente.

Esta figura muestra el núcleo de modulación del VCA: un par diferencial de transistores (Q1 y Q2) que convierte las tensiones de entrada (audio y control) en una corriente proporcional. El equilibrio entre ambos transistores determina cuánta señal de audio se amplifica. La corriente se convierte finalmente en una tensión mediante el amplificador operacional U1, ajustando así el nivel de salida en función de la corriente total resultante.

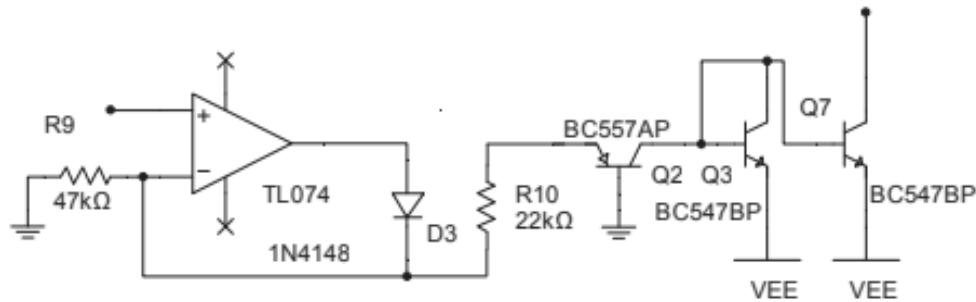


Figura 15. Amplificador diferencial de corriente.

La señal de control (CV, típica de envolvente ADSR) entra a un operacional TL074 y diodo 1N4148, formando un “diodo ideal” (rectificación sin caída) para asegurar que sólo pasen tensiones positivas.

El bloque Q2, Q3 y Q7 (BC557/BC547) adapta la señal a un formato de corriente exacto, mediante configuración de espejo de corriente, asegurando linealidad y estabilidad en la modulación.

Esta etapa protege y adapta la señal de control para un funcionamiento suave del VCA.

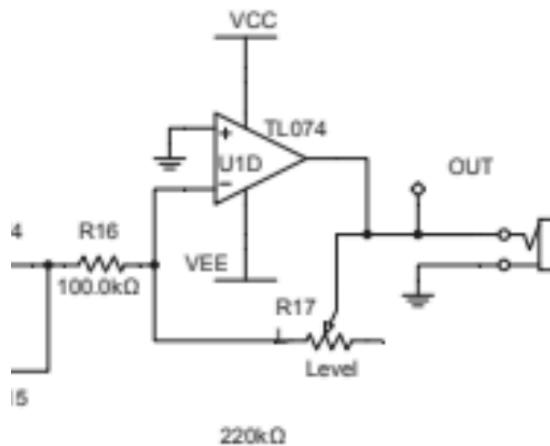


Figura 16. Configuración operacional TL074.

El audio amplificado es llevado por un operacional (TL074) que sirve como buffer y permite ajustar el nivel final con un potenciómetro (Level).

La resistencia de salida asegura buena adaptación y mantiene baja impedancia ($<1\text{k}\Omega$).

Permite conectar el VCA con otros módulos, mesa de mezcla o sistema Eurorack estándar.

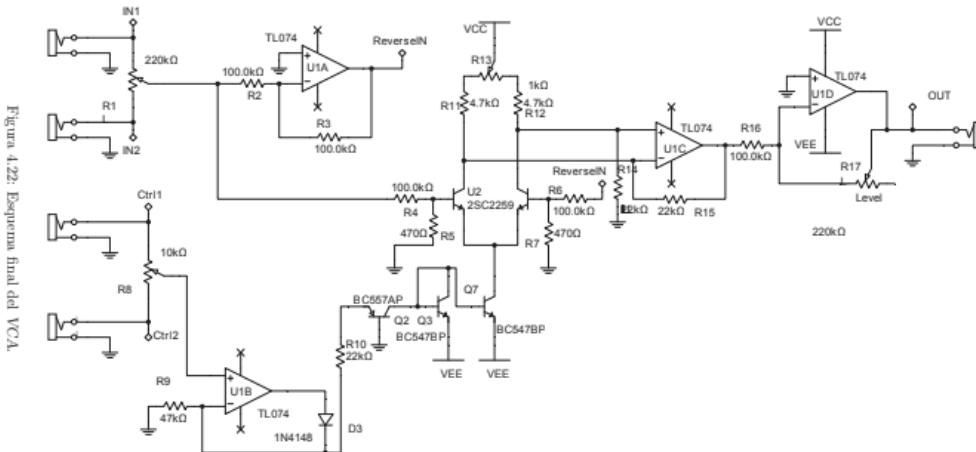


Figura 17. Integración del circuito.

Este último diagrama integra todas las etapas: mezcladores de entrada para varias señales de audio y control, el procesamiento de la CV , el núcleo de amplificación con el par diferencial, y la etapa de salida. El diseño modular permite integrar este VCA a otros módulos del sintetizador, garantizando un control flexible y eficiente de la amplitud del sonido, con entradas para múltiples fuentes y calibraciones para asegurar un funcionamiento óptimo en todo el rango dinámico.

Ejemplo de VA en el mercado:

Características	Erica Synths Black Quad VCA2	Doepfer A-134-2 Quad VCA
Canales	4 independientes de VCA + mezclador integrado	4 canales de VCA lineales + mezclador integrado
Curva de respuesta (Lin vs log)	Cada canal puede cambiar entre lineal y logarítmica	Solo respuesta lineal
Entradas/Salidas DC-acopladas	Al menos algunas entradas (permite audio y CV)	Entradas/Salidas DC – acopladas para audio y CV
Tamaño en HP (Eurorack)	10 HP	8 HP
Corriente / Consumo de energía	+ 12V: ~62mA / -12V: ~60mA (Aprox)	+12 V: ~40mA / -12V: ~40mA (Aprox)
Ventajas destacadas	Alta versatilidad (Lin/log), modo mixer, construcción de gama alta	Muy compacto (8HP), buena relación espacio/función, ideal para rack limitado
Posibles desventajas	Ocupa mas espacio y puede costar mas	Solo curva linea menos opción para usarlo como volumen auditivo natural.
Ideal para ...	Sistemas modulares más amplios	Sistemas con espacio limitado, presupuesto moderado, necesidad de muchas señales básicas.

Para el EG y LFO :

Opción A — ADSR con NE555 + diodos + buffer TL071

Arquitectura: Temporizador NE555 que commuta las rutas de Ataque/Decaimiento/Release mediante diodos; Sustain por potenciómetro; selector Fast/Slow (C3/C4) para rango de tiempos; TL071 como buffer/escala a 0–10 V; dos salidas (nodo crudo y salida bufereada).

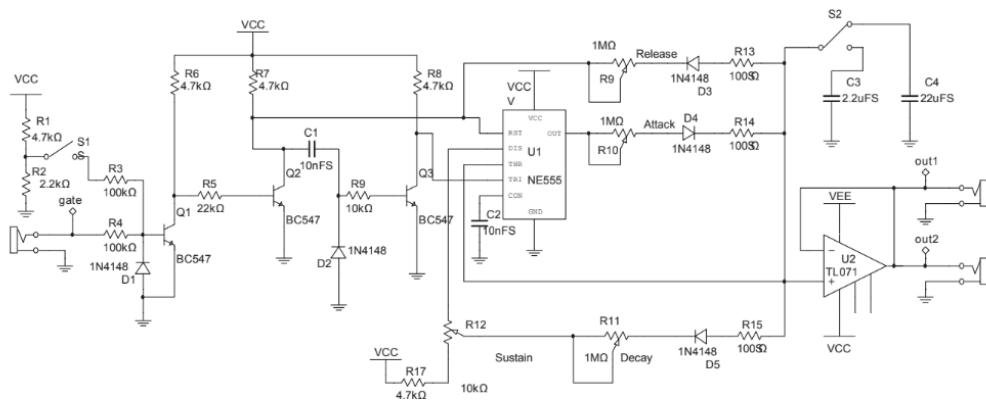


Figura 18. Esquema del generador envolvente

Acondicionamiento de Gate:

Entrada “GATE IN” (≥ 5 V) → red de protección (diodos a rieles) + transistor/RC que entrega al 555 un trigger/reset limpio (sin rebotes ni ruido).

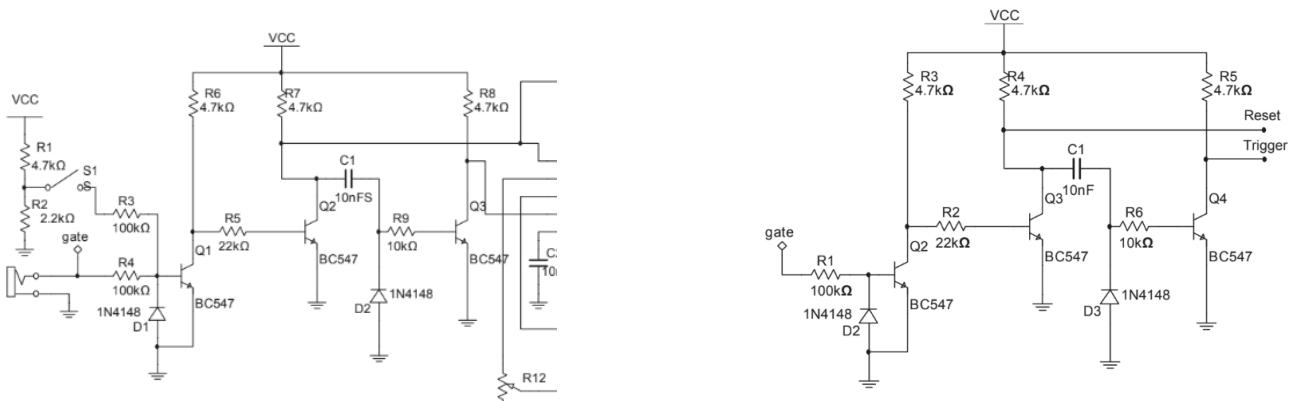


Figura 19. Conversor de señal gate a trigger.

Temporizador NE555

Usa sus umbrales internos 1/3 VCC y 2/3 VCC para cargar o descargar el capacitor de la envolvente.

Rutas de tiempos (A/D/R)

Attack (A): corriente hacia el capacitor por un potenciómetro RA (con un $100\ \Omega$ en serie y un diodo que dirige el sentido).

Decay (D) y Release (R): corriente saliendo del capacitor por RD o RR (cada uno con su $100\ \Omega$ y su diodo).

Los diodos aíslan cada fase: el ajuste de A no “mete mano” en D/R y viceversa.

Sustain (S): Potenciómetro que fija el nivel del “peldaño” al que debe caer la envolvente durante la tecla sostenida.

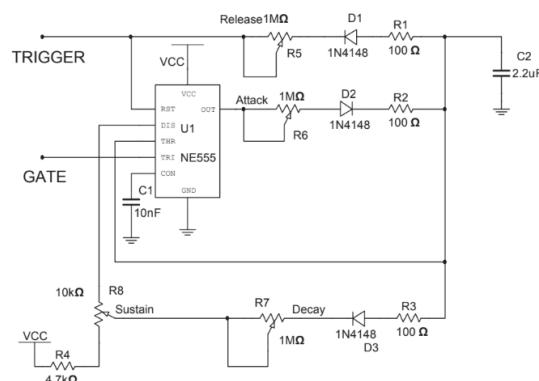


Figura 20. Circuito inicial de generador de envolvente basado en NE555.

Selector Fast/Slow (C3/C4)

Conmutas el **valor del capacitor** principal para ampliar el rango de tiempos sin cambiar potenciómetro

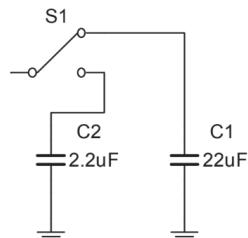


Figura 21. Conmutador del condensador de TRESHOLD.

Etapa de salida (TL071)

Seguidor/amplificador que escala la envolvente a 0–10 V y baja la impedancia ($Z_{out} \leq 1 \text{ k}\Omega$).

Puedes exponer dos salidas: el nodo crudo del capacitor (útil para medición) y la salida bufereada/escala (para VCA/VCF).

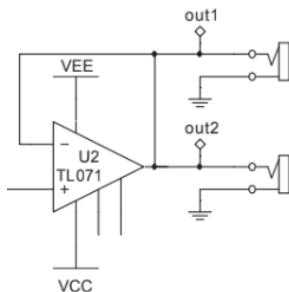


Figura 22. Salida del amplificador.

Criterios de ACEPTACIÓN (pruebas medibles)

1. **Alimentación:** opera en ± 5 V (op-amp) y $+5$ V (555); consumo dentro del presupuesto.
2. **Gate:** dispara siempre con ≥ 5 V y no dispara con ≤ 1 V; ancho de 2–5 ms produce ataque correcto.
3. **Tiempos:** con Fast y Slow, A/D/R cubren 1 ms–5 s ($\pm 10\%$) medidos a 10–90 % del nivel.
4. **Salida:** 0–10 V ($\pm 2\%$) en $10\text{ k}\Omega$; $Z_{\text{out}} \leq 1\text{ k}\Omega$.
5. **Ruido:** < -60 dBV (20 Hz–20 kHz) con Gate=LOW.
6. **Sustain:** mantiene el nivel ajustado durante Gate HIGH sin afectar el Decay (si S va bufereado).

5) Notas de implementación recomendadas:

Diodos en A/D/R: usar Schottky (BAT54/BAT43) para mínimos más rápidos; si no hay, 1N4148.

Desacople: 100 nF junto a cada IC + 10 μF por riel.

Escala a 10 V: ajustar la ganancia del TL071 (no inversor) a $1+R_f/R_g$ para clavar 10 V de pico.

Buffer de Sustain: añadir seguidor para S si quieres separación S↔D impecable.

Opción B — “Fastest ADSR in the West” (René Schmitz, 7555 + TL074)

Arquitectura: Temporizador ICM7555 (versión CMOS) con diodos Schottky en A/D/R; Sustain bufereado; salidas con attenuverter y driver de LED usando TL074.

Rene Schmitz
Fastest ADSR in the West.

Schematic re-drawn by Eddy Bergman
Additions by Eddy Bergman

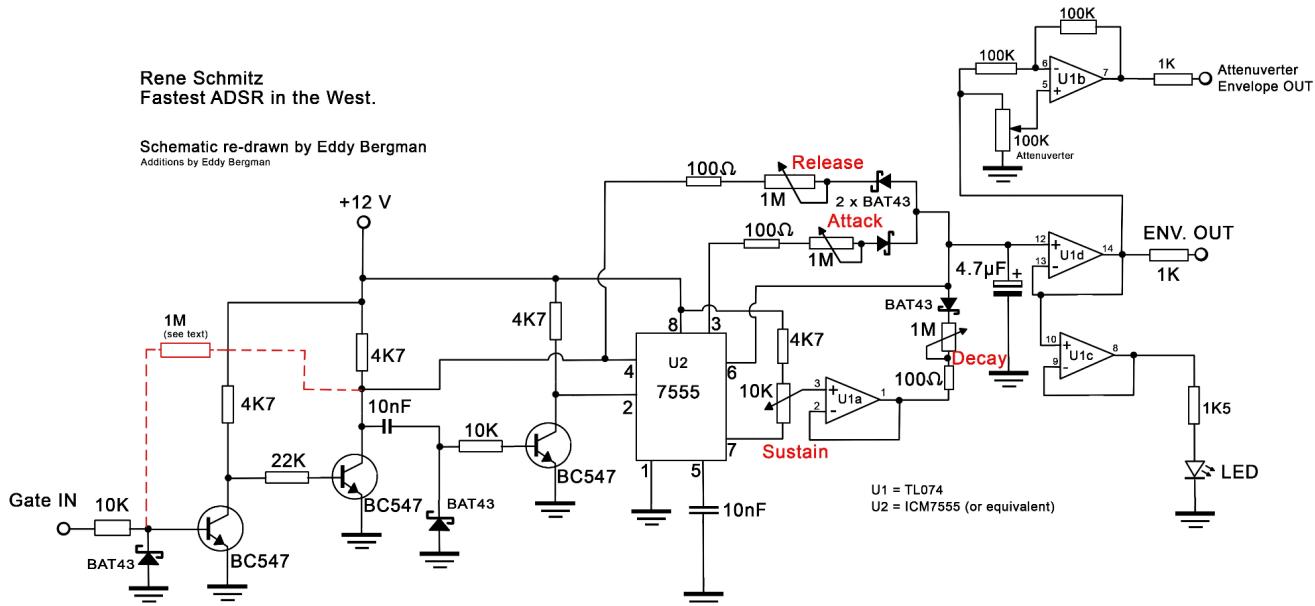


Figura 22. Esquema general ADSR opción B.

Acondicionamiento de Gate

Entrada GATE IN (≥ 5 V) → diodo de protección + transistor/RC para dar al 7555 un trigger/reset limpio (sin rebotes).

Temporizador ICM7555 (CMOS)

Igual que el 555, usa umbrales 1/3 VCC y 2/3 VCC, pero con menor consumo y “picos” en la fuente.

El pin **DISCH** gobierna la descarga del capacitor de envolvente.

Rutas de tiempos con diodos Schottky (A/D/R)

Attack (A): corriente hacia el capacitor vía RA ($1\text{ M}\Omega$ típico) + $100\ \Omega$ en serie + Schottky → subida rápida.

Decay (D) y Release (R): corriente desde el capacitor por RD/RR con sus 100 Ω y Schottky dedicados.

Los Schottky (BAT43/BAT54) tienen menor caída \approx 0.2–0.3 V → transiciones más “vivas”.

Sustain bufereado

Pot de Sustain va a un seguidor de op-amp (TL074).

Ventaja clave: el Decay no depende de la posición de Sustain (separación S↔D real).

Etapas de salida

ENV OUT: buffer dedicado (TL074) de baja Z.

Attenuverter: otra sección del TL074 entrega una salida atenuable e invertible (muy útil para modular VCF/VCO en positivo o negativo).

LED driver: seguidor/limitador para indicador visual sin cargar el nodo de la envolvente.

CRITERIOS DE ACEPTACIÓN (pruebas medibles)

1. **Alimentación:** funciona en ± 5 V (TL074) y +5V (ICM7555); consumo dentro del presupuesto.
 2. **Gate/Trigger:** dispara siempre con ≥ 5 V; no dispara con ≤ 1 V; pulso de 2–5 ms produce ataque completo.
 3. **Tiempos:** A/D/R cubren 1 ms–5 s ($\pm 10\%$) medidos a 10–90 % del nivel.
 4. **Sustain:** mantiene el nivel ajustado (0–100 %) durante Gate HIGH sin afectar el Decay.
 5. **ENV OUT:** 0–10 V ($\pm 2\%$) en $10\text{ k}\Omega$; $Z_{\text{out}} \leq 1\text{ k}\Omega$.
 6. **ATT OUT:** rango $\approx -10\text{ V} \dots +10\text{ V}$; inversión sin distorsión visible.
 7. **LED:** sigue la envolvente sin caída de amplitud en ENV OUT.
 8. **Ruido:** $< -60\text{ dBV}$ (20 Hz–20 kHz) con Gate=LOW.

Opción A (NE555 + TL071) — con mejoras “A+”

Motivos: componentes ultra-comunes y baratos (NE555/TL07x/1N4148/BC547, potes y capacitores), PCB compacta y puesta a punto rápida. Con las mejoras de abajo, igualas o superas la musicalidad del B (separación S↔D, menor “click”, utilidades en panel).

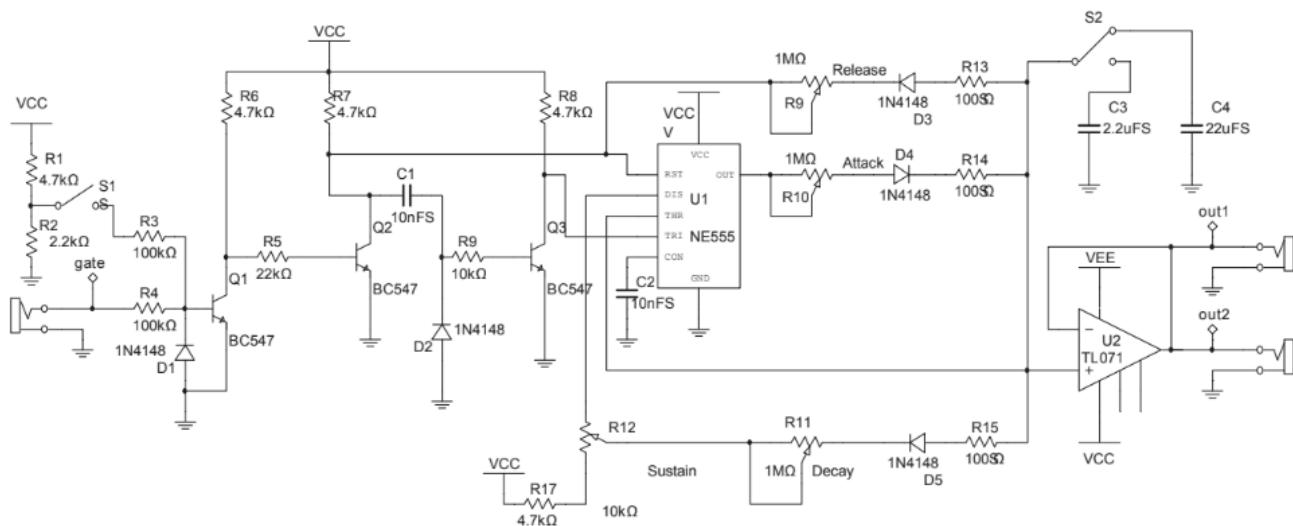


Figura 23 . Opción A diseño seleccionada.

Mejoras “A+” (qué cambiar, cómo cablear y por qué)

Se llegó a la conclusión de añadir posibles mejoras a la opción [A] en pro de posibles mejoras

1. Buffer de Sustain (separar S↔D como en la Opción B)

Qué añades: una etapa de op-amp (puedes pasar de TL071 → **TL072**).<

Cableado: pot de S ($10\text{ k}\Omega$) → entrada + de op-amp (seguidor); salida del op-amp = referencia S al comparador/555 donde fija el escalón.

Beneficio: el **Decay no depende** de la posición del Sustain (respuesta más musical).

2. Diodos Schottky en A/D/R (BAT54/BAT43)

Sustituye los 1N4148 de las rutas A, D, R por Schottky (conserva los $100\text{ }\Omega$ serie).

Beneficio: mínimos más rápidos y caída menor ⇒ transiciones más “vivas”.

Si no consigues BAT54, 1N4148 funciona (un pelín menos rápido).

3. CMOS en lugar de bipolar (opcional)

Cambia NE555 → TLC555/ICM7555 (pin-compatible).

Beneficio: menos picos de corriente en VCC ⇒ menos “clicks” por la fuente y menor consumo.

4. Salida attenuverter (-10...+10 V) adicional

Qué añades: una etapa del TL072/TL074.

Cableado típico: inversor con $R_{in}=100\text{ k}$, $R_f=100\text{ k}$, y un pot 100 k “attenuverter” en la entrada (wiper a R_{in} , extremos a ENV y GND).

Beneficio: puedes invertir y dosificar la envolvente para modular VCF/VCO sin módulos extra.

5. LED de nivel sin cargar la envolvente

Driver dedicado: usa la otra mitad del TL072 (o una del TL074) como seguidor desde ENV y luego LED + R (2–5 mA) a GND.

Beneficio: visualización sin “tirar” del nodo de ENV (curva intacta).

Se elige la Opción A (NE555 + TL071) por disponibilidad local, costo y simplicidad. Con el paquete “A+”—buffer de Sustain, Schottky en A/D/R, opción TLC555, attenuverter y LED con drivers dedicados, desacople/anti-pop y escala 0–10 V— se logra una respuesta musical, estable y totalmente compatible con el resto del sistema (Gate \geq 5 V, ENV OUT 0–10 V, Zout \leq 1 k Ω), manteniendo una BOM accesible en Colombia.

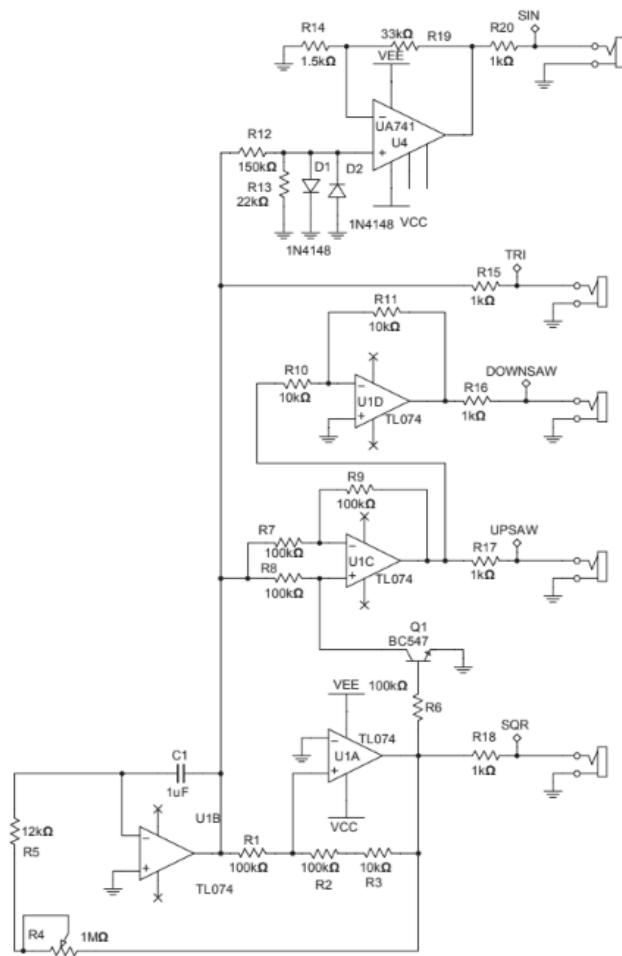


Figura 24. Esquema final oscilador de baja frecuencia.

Opción A — LFO multisalida con TL074

El diseño del oscilador de baja frecuencia está muy relacionado con el del VCO, por lo que en todas las subsecciones se hará referencia a este diseño. No obstante los requisitos generales son lógicamente distintos:

El oscilador será independiente y no dependerá de ninguna tensión de control, es decir, no es un VCO propiamente dicho.

Las frecuencias de oscilación varían desde la frecuencia más baja posible hasta unos 20Hz.

Efecto de cada bloque (lo que “aporta”)

Schmitt (U1A): conmutación **limpia e inmune a ruido**, fija **umbrales $\pm VT$** → asegura **duty ~50 %** y define la **amplitud** del triángulo.

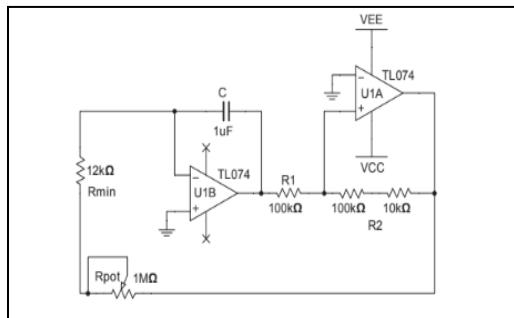


Figura 25. Esquema completo y sección Integrador y Schmitt trigger.

Integrador (U1B): convierte la cuadrada en rampa lineal; la frecuencia depende sólo de $R_{in} \cdot C$ y de β → muy predecible y fácil de ajustar.

Waveshaping de onda triangular a senoidal

Los mismos principios explicados en el VCO pueden aplicarse al conformador de onda sinusoidal del LFO. Mediante un circuito realimentado negativamente con componentes no lineales se puede crear una función de transferencia definida a trozos con el objetivo de suavizar las transiciones de la onda triangular y minimizar su THD.

Conversión de onda triangular a diente de sierra

Del mismo modo, para la obtención de la onda de diente de sierra se sigue el mismo diseño que con el VCO. Mediante un amplificador de configuración variable entre inversor y no inversor se aprovecha la relación lógica existente entre las señales triangular y cuadrada para conformar un diente de sierra ascendente.

Conversión de diente de sierra a señal rampa.

La diferencia entre diente de sierra y señal rampa es la pendiente de cada ciclo, siendo ascendente en el diente de sierra y descendiente en la rampa. Mediante una inversión del voltaje instantáneo del diente de sierra puede obtenerse la señal deseada, por lo que basta con un amplificador inversor de ganancia $G = -1$ para tener la última onda del LFO.

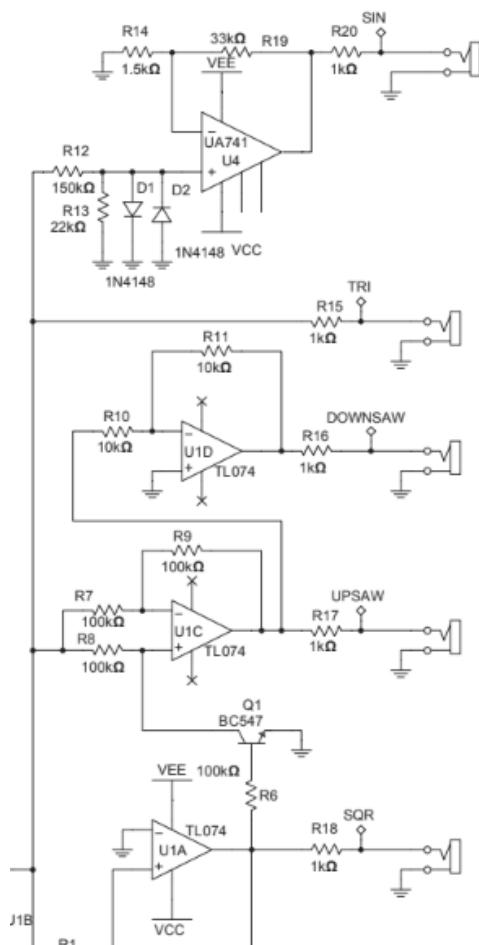


Figura 26. Sección de salida
SQR, TRI, UPSAW, DOWNSAW, SINE.

Opción B Sagittronics 2019

Arquitectura

Núcleo: Schmitt + integrador (igual principio).

Extras: buffer de SQR dedicado, LED de rate, R₆=10 MΩ de “desestabilización” (arranque garantizado).

Salidas: SQR, TRI, SINE.

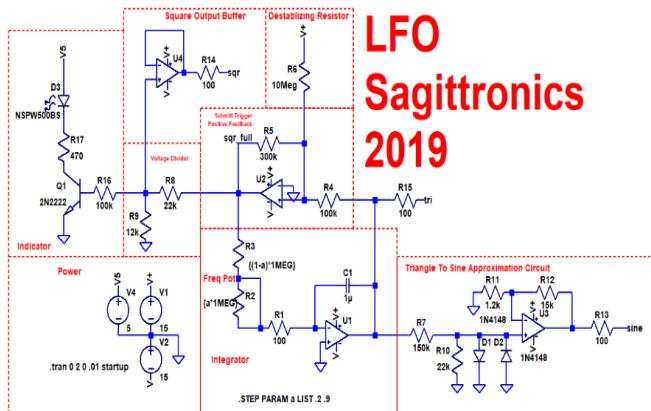


Figura 27. Esquema Completo LFO opción B.

Cómo funciona:

El Schmitt con histéresis asegura comutación limpia, fija amplitud del triángulo ($\approx \pm VT$) y duty $\approx 50\%$.

El integrador genera la rampa; la frecuencia depende de R y C1 (misma fórmula).

El sine shaper curva el tri hasta un seno de baja THD.

Rango/frecuencia

Igual: añade switch de C1 (100 nF/1 μ F) para 0.05–20 Hz típico.

Pros

Más simple y rápido de montar y depurar (menos bloques).

BOM más corta y barata.

Arranque seguro ($10 \text{ M}\Omega$) y SQR ya bufereada (Z_{out} baja).

Calibración rápida: solo el seno.

Contras

Menos formas (no trae UPSAW/DOWNSAW).

Si luego quieras sierras, debes añadir un shaper extra.

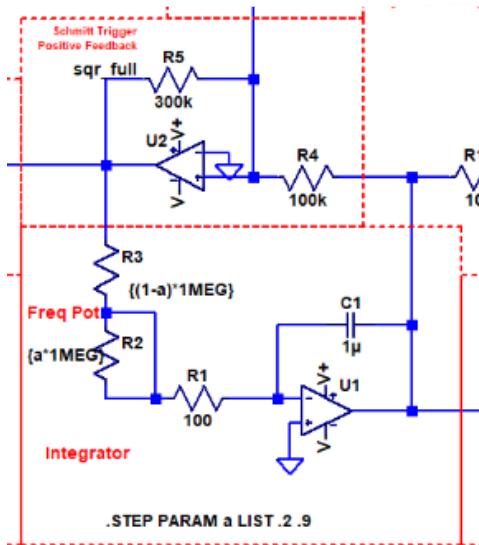


Figura 28. Sección Schmitt Trigger Integrador.

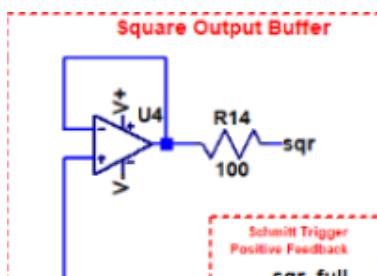


Figura 29. Buffer de salida señal cuadrada.

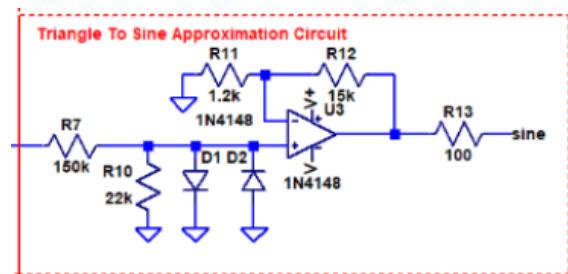


Figura 30. Triangular
a seno.

¿Cuál conviene ?

Decisión

Se elige el LFO *Sagittronics 2019* cuando el criterio dominante es poco tiempo + máxima sencillez + entregable confiable.

Si la rúbrica exige sierras separadas (UP/DOWN) como requisito explícito, mantengo mi LFO multusalida y aplicó tres mejoras mínimas (TL071, Rstart 10 MΩ, selector de C1).

Por qué Sagittronics 2019 es la mejor opción “rápida”

Menos bloques: núcleo (Schmitt + integrador) + shaper de seno + LED. No hay etapas extras de sierra.

BOM más corta y barata: cabe en un TL074 + 2N2222 + diodos comunes.

Arranque garantizado: incluye R6 = 10 MΩ que “rompe la simetría” al encender → el oscilador siempre inicia.

Cuadrada ya bufereada: salida SQR con baja impedancia; el patch externo no perturba el núcleo.

Calibración rápida: solo se ajusta el shaper de seno; el triángulo sale lineal de fábrica.

Depuración fácil: nodos claramente separados (SQR full, TRI, SINE IN/OUT, LED) → diagnóstico en minutos.

Qué pierdo frente a mi LFO multusalida: no tengo UPSHAW/DOWN SAW integradas. Si luego las quiero, puedo añadir un shaper de sierra como submódulo sin tocar el núcleo.

Plan de implementación (Sagittronics 2019)

1. Núcleo Schmitt + Integrador (TL074)

Umbrales del Schmitt definen la amplitud del triángulo ($\approx \pm VT$).

$$\text{Frecuencia: } F \approx \frac{VH}{4VT R C1}.$$

Añade selector de C1 (SPDT: 100 nF / 1 μF; opcional 10 μF).

2. Arranque asegurado

Mantén R6 = 10 MΩ desde la salida cuadrada del Schmitt al nodo sumador del integrador.

3. Salidas

SQR: deja el buffer y agrega 1 kΩ en serie al jack.

TRI: buffer con ganancia para normalizar a 10 Vpp; 1 kΩ serie.

SINE: shaper por diodos; ajusta para THD baja; 1 kΩ serie.

(Opcional) versión **0–10 V**: un buffer adicional con offset +5 V en la(s) salida(s) que lo requieran.

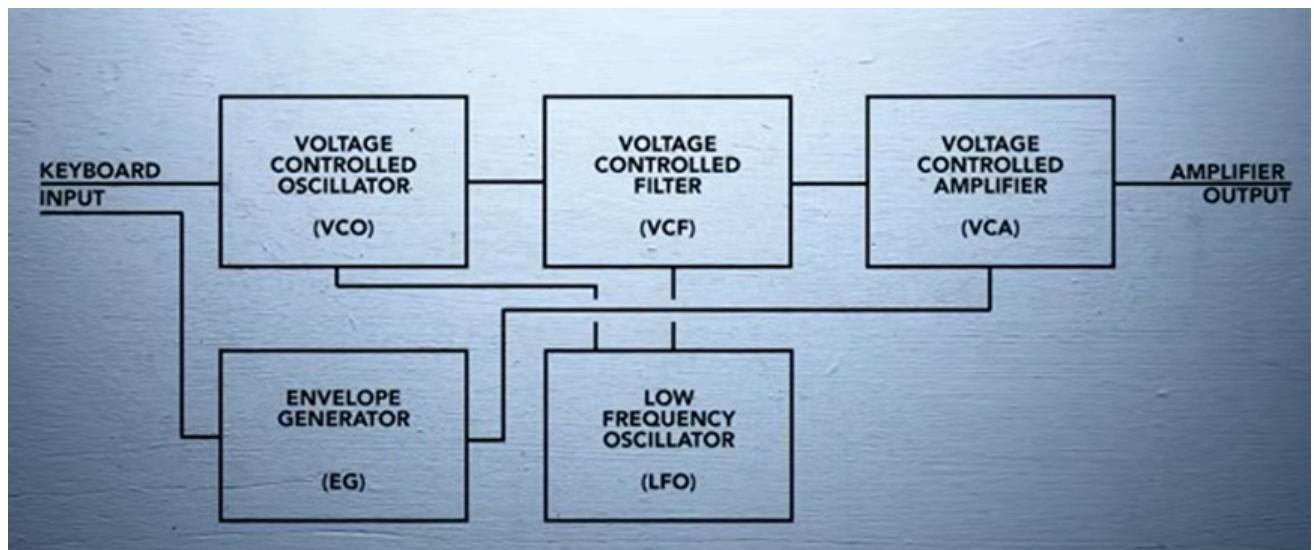
4. LED indicador (2N2222)

Útil como “vivo” del módulo y para diagnóstico rápido.

Criterios de aceptación (pruebas medibles)

1. **Frecuencia** en FAST/SLOW dentro de rango ($\pm 10\%$).
2. **Amplitud**: TRI/SQR/SINE = 10 Vpp ($\pm 5\%$).
3. **Sine THD**: $< \sim 5\%$ en 0.1–5 Hz (tras ajustar el shaper).
4. **Zout**: $\leq 1\text{ k}\Omega$ (no cae apreciablemente con carga de 10 kΩ).
5. **Duty del SQR**: $50\% \pm 5\%$.
6. **Arranque**: oscila siempre al energizar (gracias a $R_6=10\text{ M}\Omega$).
7. **Ruido**: sin clicks audibles al modular VCF/VCA; rieles limpios con el desacople indicado.

4.4. Diagrama de bloques del sistema y flujo de señal



Teniendo en cuenta el parlante se implementa después de la etapa VCA.

5. Planeación del Diseño Colaborativo

5.1. Identificación de los subsistemas principales:

El sintetizador modular analógico se ha dividido en cinco subsistemas funcionales, de acuerdo con la estructura clásica de síntesis sustractiva y las necesidades de control y modulación del proyecto.

Cada subsistema representa un bloque independiente en términos de diseño, pruebas y validación:

Subsistema	Descripción funcional
VCO (Voltage Controlled Oscillator)	Genera las formas de onda fundamentales (cuadrada, sierra, triangular), controladas por tensión (1 V/oct).
VCF (Voltage Controlled Filter)	Filtre y modela el contenido armónico de la señal, con control de frecuencia de corte y resonancia.
VCA (Voltage Controlled Amplifier)	Regula la amplitud de la señal de audio en función de una señal de control.
EG / ADSR (Envelope Generator)	Produce una envolvente de cuatro fases (Attack, Decay, Sustain, Release) para controlar el VCA o VCF.
LFO (Low Frequency Oscillator)	Genera señales periódicas de baja frecuencia utilizadas para modulación de tono o amplitud.

Estos bloques se integran en una cadena de señal:

VCO → VCF → VCA → Parlante USB (salida activa),

mientras que EG y LFO proporcionan señales de control auxiliares para los demás módulos.

5.2. Estrategia de división del trabajo en cuatro equipos:

Para optimizar el desarrollo y favorecer la especialización técnica, se adoptó una estrategia de distribución modular del trabajo.

Cada grupo asume la responsabilidad completa sobre el diseño, implementación, pruebas y documentación de su(s) bloque(s) asignado(s):

Grupo	Bloque(s) asignado(s)	Principales tareas
Grupo 1	VCO	Implementación del oscilador controlado por voltaje, calibración 1 V/octava, estabilidad térmica, generación de formas de onda.
Grupo 2	EG (ADSR) y LFO	Diseño del generador de envolvente y oscilador de baja frecuencia, ajuste de tiempos y rangos de modulación.
Grupo 3	VCF	Diseño del filtro tipo ladder, ajuste de frecuencia de corte, resonancia y respuesta al control por voltaje.
Grupo 4	VCA	Implementación del amplificador controlado por voltaje, linealidad y control dinámico de amplitud.

Cada grupo es responsable de entregar:

- El esquema eléctrico detallado de su módulo.
- El prototipo funcional en protoboard.
- Un informe técnico breve con resultados de pruebas, observaciones y recomendaciones para integración.

5.3. Roles y responsabilidades propuestas por los estudiantes

Cada grupo de trabajo está conformado por cinco estudiantes, quienes se organizan internamente para cubrir todas las fases del diseño de su módulo asignado.

Dado que cada bloque del sintetizador (VCO, VCF, VCA, EG/LFO) presenta una estructura circuital con varias subetapas, los equipos adoptaron una división interna funcional, de modo que todos los integrantes participen activamente en tareas complementarias.

En términos generales, cada grupo distribuye sus responsabilidades de la siguiente forma:

Dos integrantes se enfocan en la primera sección del circuito, que abarca el diseño del núcleo funcional del módulo: análisis teórico, elaboración del esquema, simulación electrónica y selección de componentes.

Estos miembros asumen el trabajo de base del funcionamiento eléctrico, asegurando la correcta respuesta de la etapa principal (por ejemplo, oscilación, filtrado o control por voltaje, según el módulo asignado).

Tres integrantes se encargan de la segunda sección del circuito y validación práctica, abarcando tareas de montaje en protoboard, pruebas experimentales, ajuste de parámetros, documentación y análisis de resultados.

Este subgrupo garantiza que el módulo sea funcional, estable y compatible con el resto del sistema.

5.4. Cronograma preliminar de desarrollo (por fases del diseño)

Fase	Duración	Actividades principales	Responsables
Semana 1 (27 oct – 1 nov)	1 semana	Asignación formal de etapas, revisión de referencias técnicas (PDF base y Moog Mavis), definición de requerimientos.	Todos los grupos
Semana 2 (3 nov – 8 nov)	1 semana	Primer avance en protoboard de los módulos propuestos, pruebas individuales de funcionamiento.	Grupos 1–4
Semana 3 (10 nov – 15 nov)	1 semana	Segundo avance en protoboard, ajustes y validación de parámetros eléctricos y de control.	Grupos 1–4
Semana 4 (17 nov – 22 nov)	1 semana	Pruebas finales, integración de módulos, verificación de interconectividad y presentación del prototipo conjunto.	Todos los grupos
Sustentación (25–26 nov)	2 días	Presentación final del sistema, demostración funcional y entrega de documentos consolidados.	Todos los grupos

5.5. Riesgos y estrategias de mitigación:

Durante el desarrollo del proyecto se identificaron posibles riesgos técnicos y organizativos, junto con las acciones preventivas correspondientes:

Riesgo identificado	Descripción	Estrategia de mitigación
Incompatibilidad entre módulos	Diferencias en niveles de voltaje o polaridad de señales.	Definir desde el inicio niveles estándar (1 V/oct, ±5 V máx), y usar minijacks normalizados.
Ruido o interferencia en señales de audio	Acoplamiento entre cables de control y audio.	Implementar conexión a tierra en estrella y cables apantallados.
Errores de diseño o montaje en protoboard	Fallas por conexiones sueltas o componentes incorrectos.	Revisiones cruzadas entre grupos y pruebas por etapas.
Retrasos en la construcción	Falta de materiales o problemas de coordinación.	Planificación anticipada y comunicación semanal con responsables.
Desbalance de carga de trabajo	Algunos grupos podrían requerir más tiempo por la complejidad del módulo.	Ajustar tareas de apoyo (documentación, integración, pruebas comunes).
Ruido o sobrecarga del parlante USB	Diferencia de niveles entre salida del VCA y entrada del parlante.	Uso de resistencias de atenuación y pruebas de nivel previas a la conexión final.

Referencias Bibliográficas:

- [1] G. Recio Cervantes, *Proyecto Final de Carrera: Sintetizador Analógico Modular*. Universidad Politécnica, 2020.
- [2] N. Steiner, “Synthacon VCF design,” *Steiner-Parker Synthacon Service Manual*, 1974.
- [3] E. Moine, “Steiner VCF Documentation,” *YuSynth Modular Synthesizer*, 2018.
- [4] E. Bergman, “Synthesizer build part 26: Steiner VCF,” *Eddy Bergman Electronics Blog*, Apr. 2020. [Online]. Available: <https://www.eddybergman.com/2020/04/synthesizer-build-part-26-steiner-vcf.html>.
- [5] “Filtre Steiner-Parker,” *Wikipedia*, 2023. [Online]. Available: https://fr.wikipedia.org/wiki/Filtre_Steiner-Parker.
- [6] “Voltage Controlled Filter Project,” *Analogue Realities*, 2021. [Online]. Available: <https://analogue-realities.com/projects/voltage-controlled-filter>.
- [7] Texas Instruments, *LM13700 Dual Operational Transconductance Amplifier Datasheet*, Rev. D, Sept. 2019. [Online]. Available: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm13700.pdf>.
- [8] “Discussion: LM13700-based Filters,” *Mod Wiggler Forum*, 2022. [Online]. Available: <https://modwiggler.com/forum/viewtopic.php?t=259609>.
- [9] G. Recio Cervantes, *Diseño e implementación de un sintetizador analógico modular*. Proyecto Fin de Carrera, EUIT Telecomunicación, Univ. Politécnica de Madrid, Madrid, España, 2013.
- [10] R. Schmitz, “The Fastest ADSR in the West,” Schmitzbits, artículo técnico en línea. Accessed: Nov. 1, 2025.
- [11] E. Bergman, “Fastest ADSR in the West (R. Schmitz) — schematic redrawn and build notes,” blog técnico. Accessed: Nov. 1, 2025.
- [12] Sagittronics, “Simple LFO (2019): Schmitt + Integrator with square buffer and triangle-to-sine shaper,” nota de aplicación. Accessed: Nov. 1, 2025.
- [13] Y. Usson (YuSynth), “VC-LFO-1 / VC-LFO-2 — Voltage-Controlled LFO,” documentación y PCB. Accessed: Nov. 1, 2025.
- [14] Kassutronics, “Variable Waveshape LFO (Schmitt + Integrator, morph saw↓–tri–saw↑),” artículo técnico. Accessed: Nov. 1, 2025.

Anexos:

https://drive.google.com/file/d/1saHsb4tgQTuY0e58V2zICDxJfNvoIP6b/view?usp=drive_link

https://oa.upm.es/16279/1/PFC_GONZALO_RECIO_CERVANTES.pdf