



**FACULTAD  
DE INGENIERIA**

Universidad de Buenos Aires

Departamento de Electrónica

## 66.10 Circuitos Electrónicos II

Proyecto: Etapa de Potencia Mono Clase G

<b>Chaure Fernando</b>	90389
<b>Combier Natasha</b>	Intercambio
<b>Marchi Pablo</b>	90603
<b>Müller Miguel</b>	86130
<b>Zurita Francisco</b>	89722

5 de julio de 2012

Cuatrimestre / Año	1.º cuatrimestre 2012
Profesores:	Ing. Alberto Bertuccio

Fecha de entrega	Firma

Nota	Fecha de aprobación			Firma

Obsevaciones: \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

# Índice

<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Amplificadores de potencia . . . . .	1
1.1.1. Amplificadores clase A . . . . .	2
1.1.2. Amplificador clase B . . . . .	2
1.1.3. Amplificador clase “AB” . . . . .	3
1.1.4. Amplificador clase C . . . . .	3
1.1.5. Amplificador clase D . . . . .	4
1.1.6. Amplificadores clase G . . . . .	4
1.2. Principales especificaciones de un amplificador . . . . .	5
1.2.1. Potencia máxima . . . . .	5
1.2.2. Respuesta en frecuencia . . . . .	5
1.2.3. Rango dinámico . . . . .	6
1.2.4. Distorsión armónica total . . . . .	6
<b>2. Objetivos</b>	<b>7</b>
<b>3. Desarrollo</b>	<b>8</b>
3.1. Cálculos del Amplificador de Audio . . . . .	8
3.1.1. Etapa de Entrada . . . . .	8
3.1.2. Slew Rate . . . . .	8
3.1.3. Protección Contra Cortocircuitos . . . . .	9
3.2. Cálculos de las Fuentes de Alimentación . . . . .	9
3.3. Simulaciones . . . . .	9
3.3.1. Polarización . . . . .	9
3.3.2. Respuesta en Frecuencia . . . . .	9
3.3.3. Slew Rate . . . . .	10
3.3.4. Estabilidad . . . . .	11
3.4. Realización del Circuito Impreso . . . . .	12
3.4.1. Criterios de Diseño . . . . .	12
3.4.2. Desarrollo de los Criterios . . . . .	12
3.4.3. Disipadores . . . . .	14
3.4.4. Circuito Implementado . . . . .	15
3.4.5. Fuente Lineal . . . . .	15
3.5. Mediciones . . . . .	16
3.5.1. Respuesta en Frecuencia . . . . .	16
3.6. Comparativa Mediciones-Simulaciones . . . . .	16
3.7. Errores y Modificaciones al Diseño Original . . . . .	16
3.7.1. Protecciones contra cortocircuitos . . . . .	16
<b>4. Conclusiones</b>	<b>17</b>
<b>5. Anexos</b>	<b>18</b>

# 1. Introducción

El presente informe detalla el diseño e implementación de un amplificador de audio clase G. En la realización de este proyecto han sido volcados los conocimientos de la materia Circuitos Electrónicos II. En la Figura 1, se muestra el diagrama en bloques de las partes fundamentales del proyecto.

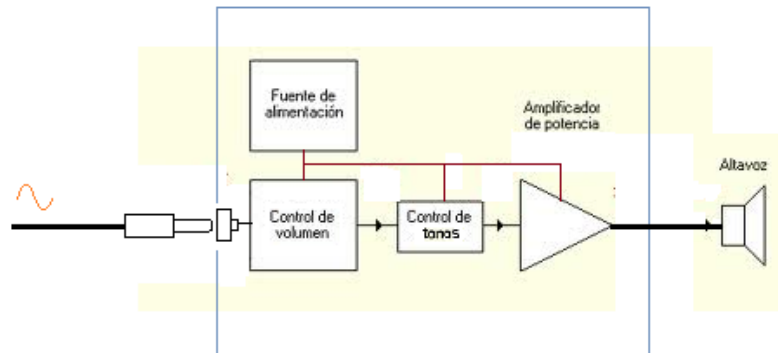


Figura 1: Esquema en bloques.

Un preamplificador es un circuito que permite adaptar las diferentes señales de entrada para luego poder ingresarlas a una etapa de potencia. Este circuito puede servir para adaptar señales de diferentes fuentes, por ejemplo: micrófonos, reproductores de mp3, salidas de placas de sonido de pc, etc. Como todos estos dispositivos no tienen el mismo nivel de salida, el preamplificador es quien se encarga de llevar a todas estas señales a una tensión de estipulada que luego entra a la etapa de potencia anteriormente nombrada. Los preamplificadores suelen ser de baja potencia y de realizarse de forma adecuada no deben distorsionar en gran medida la señal.

Alguno de los controles que pueden tener los preamplificadores son:

- Control de volumen
- Control de tono
- Control de balance
- Selector de canal de entrada
- Amplificación

## 1.1. Amplificadores de potencia

Un amplificador debe satisfacer ciertos requerimientos especiales. Uno de los más importantes es el de entregar una señal con una cantidad específica de potencia a una carga con niveles aceptablemente bajos de distorsión. Otro objetivo común en el diseño es minimizar la impedancia de salida, de tal forma que la ganancia de voltaje quede relativamente poco afectada por el valor de la impedancia de carga. Una etapa de salida bien diseñada debe cumplir con estas características de funcionamiento, consumiendo poca potencia en estado de reposo, sin que esto represente una limitación importante en la respuesta en frecuencia del amplificador.

Los amplificadores de potencia se clasifican generalmente en seis tipos: A, B, AB, C y G para diseños analógicos y clases D y E para los diseños de conmutación.

### 1.1.1. Amplificadores clase A

En esta clase de amplificadores se usa un solo transistor. El emisor seguidor es la etapa de salida clase A mas utilizada. La corriente de salida circula durante todo el ciclo de la señal de entrada, ya que el transistor esta polarizado con una corriente continua. Esta es una de las grandes desventajas de este tipo de amplificador ya que consume potencia en ausencia de señal y por lo tanto es lógico esperar un rendimiento pobre que en general no supera el 25 %. Como ventaja la distorsión introducida suele ser baja. En la Figura 2 se muestra un ejemplo de este tipo de amplificador.

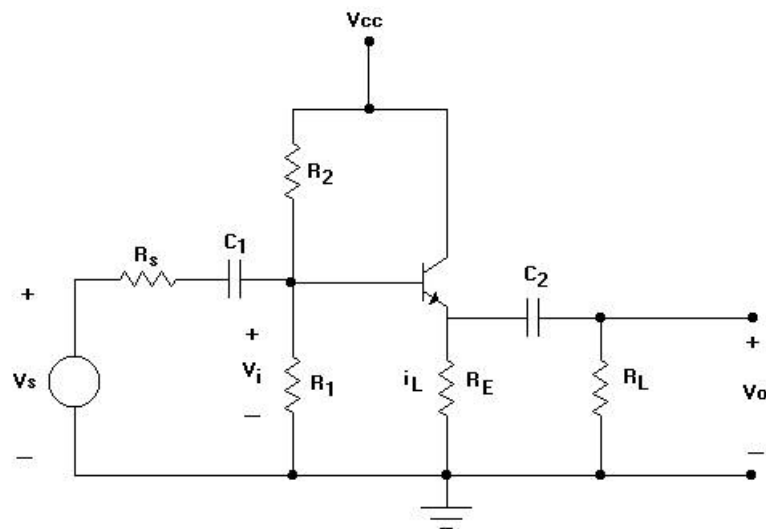


Figura 2: Ejemplo, amplificador clase A

### 1.1.2. Amplificador clase B

Esta clase de amplificadores se compone de un par de transistores (uno pnp y otro npn) conectados de forma tal que no se encuentren ambos en la zona de modo activo directo en el mismo instante de tiempo. Es decir, si suponemos tener una entrada senoidal, durante un semiciclo uno de los transistores se encuentra en la región activa, conduciendo corriente, mientras que el otro se encuentra en corte y durante el otro semiciclo viceversa. Una ventaja de esta amplificador sobre la clase A, es que los transistores no disipan potencia en ausencia de señal, lo cual mejora la vida util de los transistores y el rendimiento notablemente, alcanzando un máximo del 78 %. La desventaja en este tipo de amplificadores es la llamada “distorsión por cruce”. Es fácil detectar su procedencia al analizar la Figura 3.



Figura 3: Ejemplo, salida clase B.

Se observa que hay un intervalo de tensiones en el cual los transistores no conducen, ese rango generalmente esta dado por  $\pm 0.7$  V y esta dado por las curvas características de transferencia.

### 1.1.3. Amplificador clase “AB”

Este tipo de amplificadores recurre a la misma topología utilizada en la etapa de salida de los amplificadores clase B, con la salvedad de que aquí en los transistores circulan una corriente de polarización a modo de reducir notablemente la “distorsión por cruce”. Existen diferentes formas de logra dicho tipo de polarización. Las mas sencillas implican agregar un resistor o diodos, por los que circula una corriente fija dada por el circuito de polarización o fuente de corriente. La otra forma es utilizar los circuitos conocidos como multiplicadores de VBE , que resulta ser la forma empleada en este trabajo práctico.

### 1.1.4. Amplificador clase C

La corriente de salida solo circula durante menos de medio ciclo de la señal de entrada. Y luego se complementa la salida con un circuito compuesto de capacitores e inductores. La clase C trabaja para una banda de frecuencias estrecha y resulta muy apropiado en equipos de radiofrecuencia. Esto es debido al fenómeno de resonancia el cual se genera a la salida del amplificador cuando es sintonizado (la impedancia capacitiva e inductiva se cancelan a una frecuencia previamente calculada), aunque no trabaja arriba de 180 grados de ciclo, este amplificador a la salida genera una señal de ciclo completo de señal para la frecuencia fundamental. En la Figura 4 se muestra un ejemplo de una amplificador de esta clase. No se utiliza en sonido, por su gran nivel de distorsión y por que su operación no esta destinada para amplificadores de gran señal o gran potencia.



Figura 4: Ejemplo, amplificador clase C.

#### 1.1.5. Amplificador clase D

Esta clase de amplificadores usa señales de pulso (digitales). El uso de técnicas digitales hace posible obtener una señal que varía a lo largo del ciclo completo para producir la salida a partir de muchas partes de la señal de entrada. La principal ventaja de la operación en clase D es que los transistores MOSFET de salida trabajan solo en corte y saturación por lo que teóricamente no se disipa potencia en forma de calor y la eficiencia general puede ser muy alta, de entre 90 % a 99 %. En la práctica los MOSFETS solo disipan potencia cuando se encuentran conduciendo (saturación) debido a la pequeña resistencia de encendido que poseen, llamada  $R_{dson}$ , de todas maneras esta potencia es despreciable ya que  $R_{dson}$  es del orden de las milésimas de ohm. Se utilizan transistores MOSFET ya que son los únicos capaces de conmutar a las elevadas frecuencias de trabajo, del orden de las centenas de KHz llegando a los MHz en algunos casos.

#### 1.1.6. Amplificadores clase G

Un amplificador clase G funciona conmutando fuentes de alimentación. Para analizar su funcionamiento tendremos en cuenta un circuito básico como se muestra en la Figura 5. Mientras el nivel de la señal de entrada sea pequeño (dentro del margen de  $\pm V_1$ ), el amplificador toma la potencia de la fuente  $V_1$ . Si la señal de entrada excede el nivel de tensión dado por  $V_1$ , el circuito automáticamente corta el suministro dado por  $V_1$  y conmuta a la fuente de alimentación  $V_2$  como puede verse en la Figura 6. De esta forma la disipación de potencia es compartida por los transistores de salida, logrando así una menor disipación de potencia y una mayor eficiencia. En la práctica, la clase G se considera linealmente pobre, comparada con la clase B, dado que la conmutación de las fuentes de alimentación se realiza mediante unos diodos, dando de esta manera un resultado alineal, ya que los mismos deben almacenar y desalojar cargas.

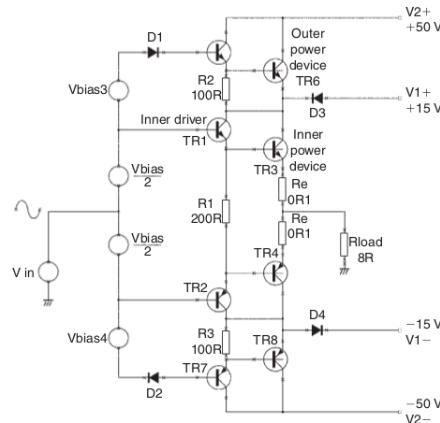


Figura 5: Ejemplo, amplificador clase G.

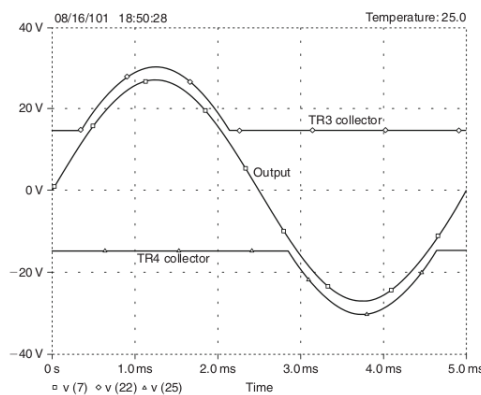


Figura 6: Encendido de fuentes V2 en salidas clase G.

## 1.2. Principales especificaciones de un amplificador

### 1.2.1. Potencia máxima

Potencia máxima eficaz, o potencia media a régimen continuo es la potencia eléctrica real verificable con instrumentos que puede proporcionar la etapa de salida a una frecuencia de 1 kHz (frecuencias medias) sobre la impedancia nominal especificada por el fabricante (normalmente 4Ω, 6Ω u 8Ω) y viene dada por la expresión  $P_O = \frac{V_{O(rms)}^2}{Z_O}$ . Donde:

$P_O$  es la potencia de salida

$V_{O(rms)}$  es la tensión eficaz de salida

$Z_O$  es la impedancia de salida

Se especifica la potencia máxima del amplificador en función de una determinada impedancia, generalmente 8Ω. Por ejemplo: 100 WRMS sobre 8Ω. Cabe destacar que si el amplificador es estéreo hay que tener en cuenta si la potencia se refiere a ambos o a cada uno de los canales.

### 1.2.2. Respuesta en frecuencia

Es un rango de frecuencias dentro del cual el amplificador responde de igual forma (respuesta plana). Este rango se espera que como mínimo incluya las audiodfrecuencias ( 20 a 20.000Hz) Pueden especificarse las frecuencias de corte, en donde la potencia cae a la mitad o la tensión

de salida cae en 3db o sino un rango de frecuencias en donde se cumple que la variación en la tensión de salida no supera una cota dado por el fabricante.

### 1.2.3. Rango dinámico

El rango dinámico(DR) es el conjunto de valores entre los niveles de mayor y menor salida, en donde el amplificador reproduce fielmente. En general viene especificado en decibels y en donde el límite superior esta acotado por la distorsión mientras que el menor esta restringido por el ruido de salida. El rango dinámico se calcula con la relación entre ambos limites, de la siguiente forma:

$$DR = \frac{S + N}{N} \quad (1)$$

donde:

S es la señal máxima permitida

N es la señal de ruido

DR es el rango dinámico

### 1.2.4. Distorsión armónica total



## 2. Objetivos

El proyecto consiste en el diseño e implementación de un amplificador de audio que cumpla con las siguientes especificaciones.

### Especificaciones iniciales (típicas) de diseño:

- Potencia de Salida: desde 25 W a 100 W RMS @ 8  $\Omega$
- Salida Clase G
- Distorsión armónica total(THD):  $< 0.002\%$  a 1 kHz ,  $< 0.01\%$  a 10 kHz: 20W (Baja tensión)
- Distorsión armónica total(THD):  $<0.003\%$  a 1 kHz ,  $< 0.02\%$  a 10 kHz: 50W (Alta tensión)
- Respuesta en frecuencia:  $\pm 0.1$  dB, 10 Hz – 30 kHz
- SNR:  $< -85$  dB (20 Hz – 20 kHz)
- Offset DC:  $< \pm 25$  mV
- Impedancia de entrada: 10 kohm
- Sensibilidad: 1V RMS
- Protección por cortocircuito y sobrecarga a la salida
- Alimentación: 220 VAC  $\pm 10/-20\%$ , 50 Hz
  - Alta tensión:  $\sim \pm 35$ V a  $\pm 50$ V (Fuente conmutada)
  - Baja tensión:  $\sim \pm 20$ V a  $\pm 25$ V (Fuente lineal)
- Eficiencia:  $> 70\%$

### Características opcionales:

- Control de volumen VCA
- Boost +10 dB @ 30 Hz
- Ecualizador gráfico 5 bandas:  $\pm 12$  dB @64Hz, 250Hz, 1kHz, 4kHz, 12kHz
- Modulador / Demodulador FM para Public Address

### 3. Desarrollo

#### 3.1. Cálculos del Amplificador de Audio

##### 3.1.1. Etapa de Entrada

Debido a que se piensa utilizar realimentación para mejorar las características del circuito, se implementa una entrada diferencial, cuya implementación más simple es un par diferencial. En parte porque se puede mejorar fácilmente utilizando:

- Fuente de corriente para su polarización, aumentando su relación de rechazo en modo común
- Realimentaciones locales para disminuir distorsiones debido a alinealidades.
- Un par de transistores en paralelo para mejorar la relación señal-ruido.
- Una fuente de corriente espejo como carga para aumentar la ganancia de corriente a la salida de esta etapa y cancelar el 2<sup>da</sup> armónica.

##### 3.1.2. Slew Rate

El capacitor de compensación C conectado alrededor del par Darlington hace que esta etapa actúe como un integrador, y la corriente que carga el punto de compensación es justamente  $I_x$ . Se puede observar que la corriente máxima disponible para cargar C es  $2I_1$ , donde  $I_1$  es la corriente en reposo por cada dispositivo en la etapa de entrada. Es decir, a grandes valores de  $V_i$  las corrientes del par diferencial se desequilibran,  $I_1$  crece hasta su valor máximo  $2I_1$  y la corriente por la otra rama del par se anula, por ende es fácil ver que por la carga activa deja de circular corriente y toda la corriente de la primer rama del par se transforma en  $I_x$ . El circuito por lo tanto opera en forma no lineal. Si la etapa de entrada actuara de forma lineal produciría una corriente  $I_x$  muy grande y el slew rate no produciría ninguna limitación.

$$V_o = \frac{1}{C} \int 2I_1 dt$$

$$SR = \frac{dV_o}{dt} = \frac{2I_1}{C}$$

Por lo tanto, realizando el calculo para nuestro circuito, siendo  $I_1 = 2.2\text{mA}$  y  $C=120\text{pF}$ . Obtenemos:

$$SR = 36 \frac{V}{\mu s}$$

### 3.1.3. Protección Contra Cortocircuitos

### 3.2. Cálculos de las Fuentes de Alimentación

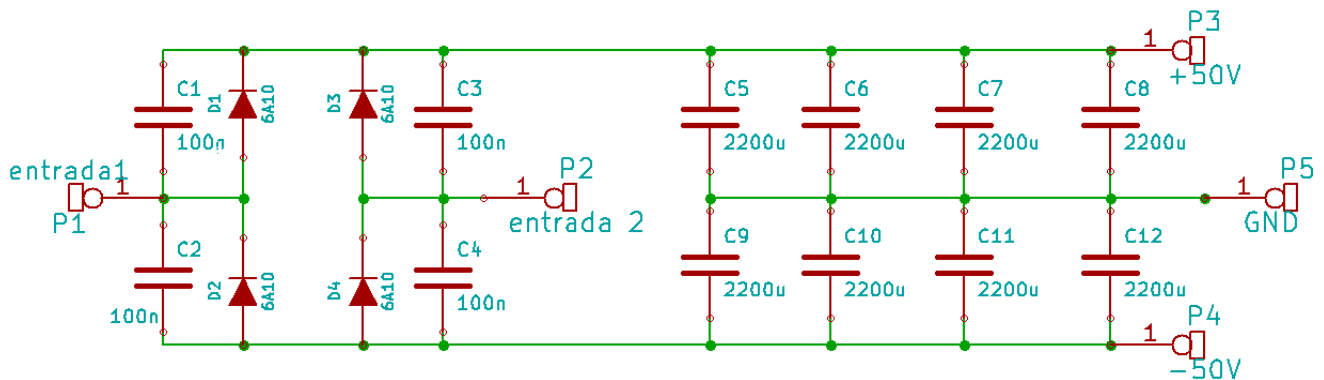


Figura 7: Esquema de la fuente lineal

### 3.3. Simulaciones

### 3.3.1. Polarización

### 3.3.2. Respuesta en Frecuencia

Se realizó un barrido en frecuencias de la ganancia del circuito a lazo cerrado para poder observar el ancho de banda del mismo. Como resultado se obtuvo una ganancia de 27.21db y un ancho de banda que va desde los 770mHz hasta los 612kHz. Como se puede observar en la Figura 8 el ancho de banda supera los requerimientos básicos pedidos.

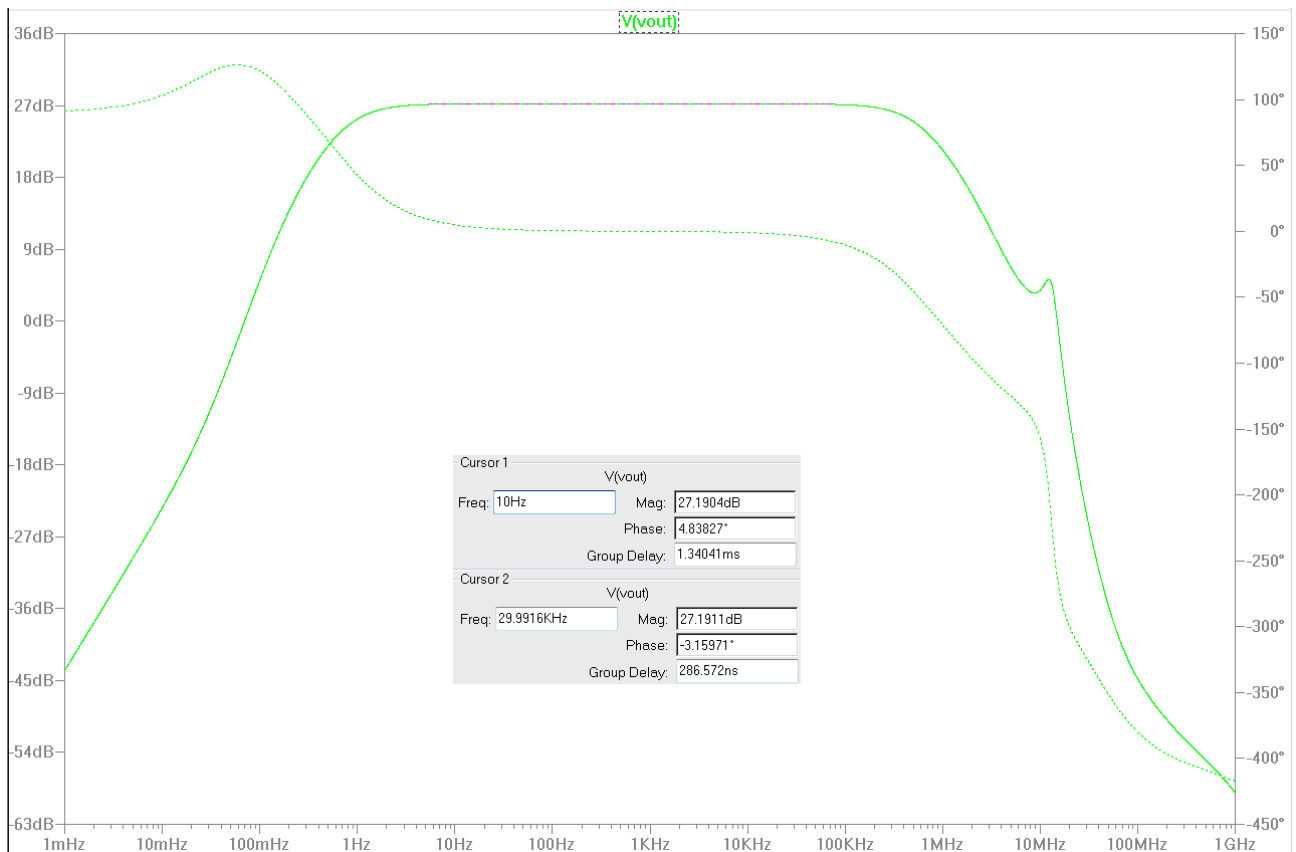


Figura 8: Respuesta en frecuencia.

### 3.3.3. Slew Rate

Para esta simulación se utilizó el circuito de la Figura 9, en el cual la entrada al amplificador es una señal escalón. Se simuló y se tomaron las tensiones en dos puntos, luego se aproxima el slew rate como la pendiente entre estos puntos. Como se ve en la Figura 10 con los puntos elegidos se obtuvo un slew rate de  $20,2 \frac{V}{\mu S}$ .

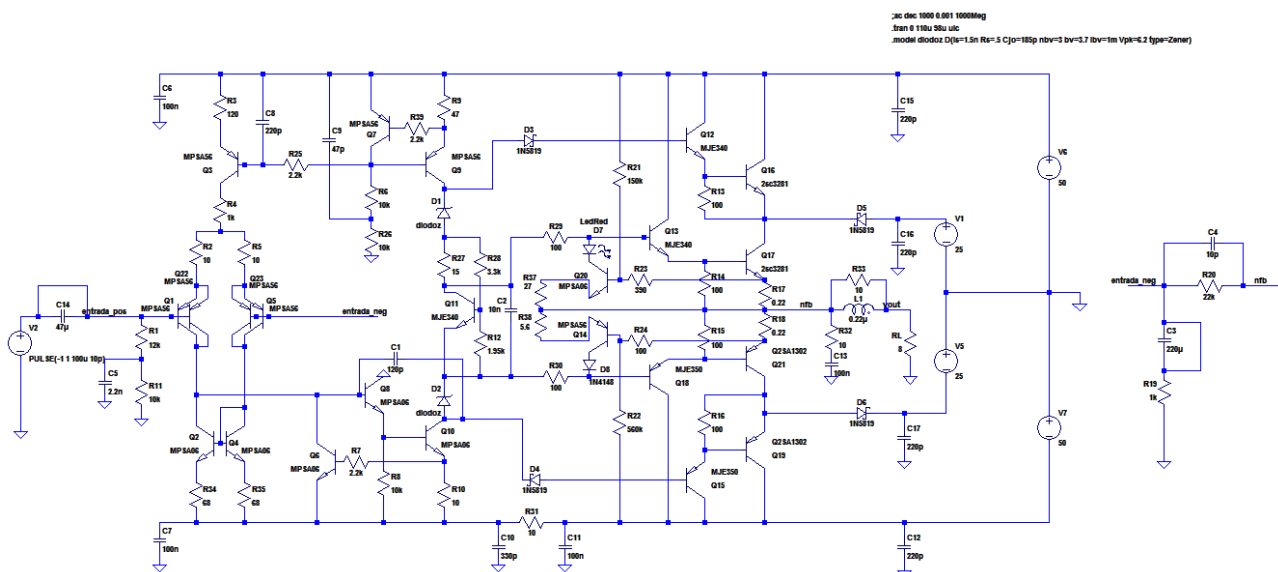


Figura 9: Circuito utilizado para obtener slew rate.

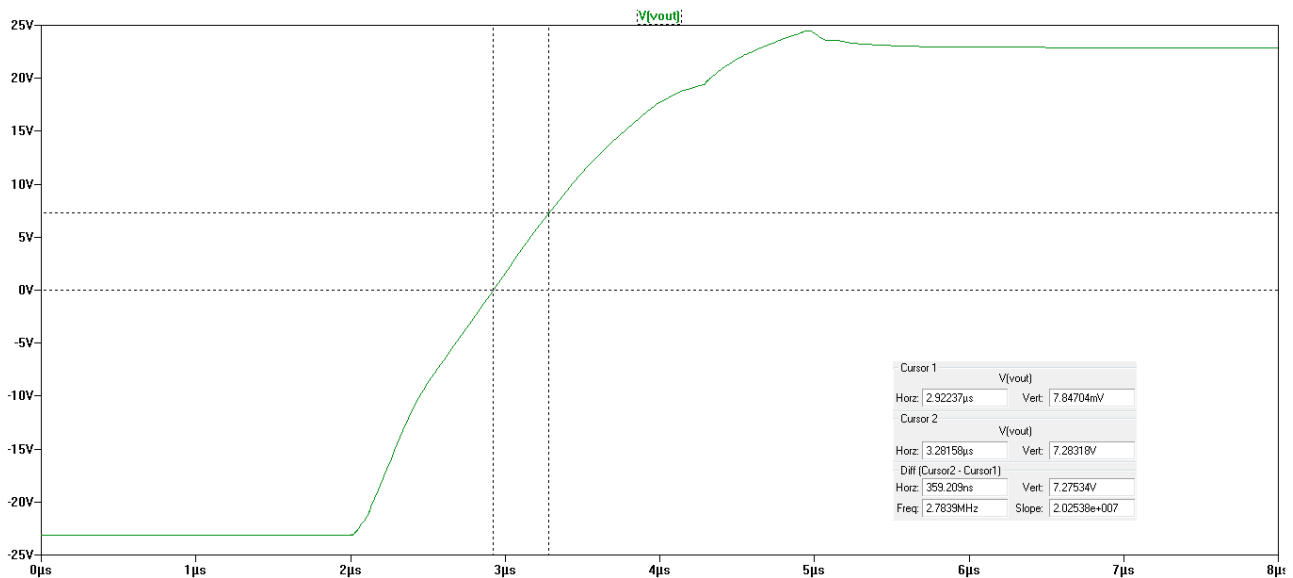


Figura 10: Simulación del slew rate.

### 3.3.4. Estabilidad

Para obtener el margen de ganancia y fase del circuito se simuló la respuesta en frecuencia de la ganancia a lazo abierto(T), para eso se modificó la topología del circuito como se ve en la Figura 11. Para obtener el margen de ganancia se determinó la ganancia con un ángulo de  $-180^\circ$ , dando un margen de 11db. Por otro lado, el margen de fase resultó de  $67^\circ$ , siendo la diferencia entre la fase a 0db y  $-180^\circ$ . Los resultados de la simulación se observan en la Figura 12.

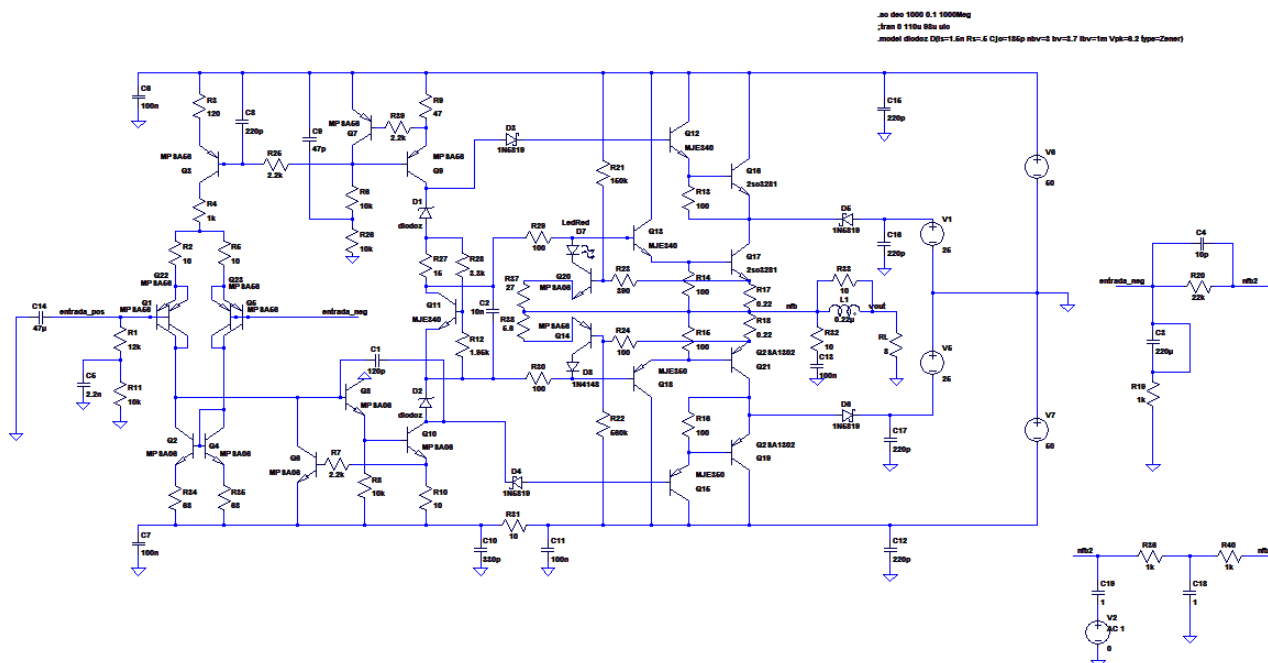


Figura 11: Circuito utilizado en análisis de estabilidad.



Figura 12: Respuesta en frecuencia de T.

### 3.4. Realización del Circuito Impreso

#### 3.4.1. Criterios de Diseño

Para obtener un circuito impreso que tenga un buen rechazo de ruido y distorsión, hay que cuidar algunas reglas de diseño.

- Caminos de los conductores de alimentación suficientemente anchos y dispuestos uno próximo al otro, con el objetivo de disminuir el área efectiva y por lo tanto la impedancia.
- Capacitores de desacople del valor adecuado, de modo que funcionen a la frecuencia correspondiente.
- Líneas de señal generando la menor área compatible con la distribución de los elementos con su camino de retorno. Especialmente los caminos de alta corriente y/o velocidad como para líneas de gran sensibilidad.
- Área efectiva del circuito lo más pequeña posible.
- Conexiones de masas y alimentación sin bucles.
- Capacidades parásitas entre masa y las líneas de señal minimizadas al alejar pistas.
- Masas de entrada y salida unidas a un solo punto en común.
- Disipadores en el borde de la placa para facilitar instalación y optimizar su disipación.

#### 3.4.2. Desarrollo de los Criterios

Ahora vamos a mostrar como fue dibujado el PCB. Son indicadas las entradas y la salida de señal y los bornes de la alimentación.

## Reglas generales de dibujo

El circuito tiene una área efectiva lo más pequeña posible con pistas tal que se minimizan las capacidades parásitas entre masa y las pistas de señal. Queremos que las conexiones de masa y alimentación no tengan bucles. Para ello, intentamos de evitar los bucles y las pistas paralelas de mucha longitud y la cercanía entre ellas. Las líneas de señal encierran la menor área posible compatible con la distribución de los elementos en su camino de retorno, cuidando especialmente los caminos de alta corriente y/o tensión de las líneas de gran sensibilidad. Para disminuir el ruido hemos intentado evitar los puentes en la medida de lo posible, reduciéndolos a 3.

## Repartición general

La geometría del circuito respeta lo mejor posible las etapas originales del amplificador de potencia. Esta disposición permite proteger la señal de entrada la cual es una de las más débiles en tensión. De hecho, cuidamos que la entrada no sea mezclada con otras pistas de mayor corriente como por ejemplo la alimentación, para evitar la inducción de ruido. Para eso también separamos las masas del circuito en dos lazos que se juntan en un punto único, separando así el camino de la corriente de alimentación del camino de la señal. Este dibujo le permite también a juntar los transistores que calentan lo que permite de compartir los disipadores.

## Alimentación

Caminos de los conductores de alimentación suficientemente anchos y dispuestos uno próximo al otro, con el objetivo de disminuir el área efectiva y por lo tanto la impedancia. Además, al estar cerca los caminos positivos y los negativos y no atravesar el circuito, su campo eléctrico no afecta al resto. También hicimos un plano de masa en estrella, para no concatenar ruido, con una parte dedicada a la entrada y la otra a la salida. Esto permite disminuir el ruido y proteger la señal de entrada. Agregamos después los capacitores de desacople del valor adecuado, de modo que funcionen a la frecuencia correspondiente. Lo hacemos lo más cerca del componente alimentado que sea posible.

## Los resistencias en el emisor de salida

Estas dos resistencias son de baja  $R$  y es importante que no se vean muy alteradas. Para evitar el cambio de temperatura hemos cuidado a que ninguna pista pasa debajo de estas dos resistencias. Además, los caminos que las conectan con la salida son anchos y perfectamente simétricos. De esta forma, las pistas no sólo incorporan poca resistencia en serie sino que además, la incorporan en igual magnitud, cuestión de no perder la simetría a la salida, y que la degeneración de los transistores de salida sea lo más simétrica posible.

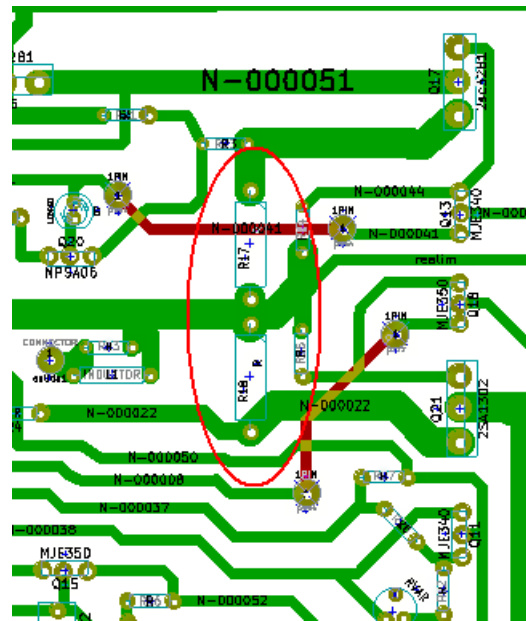


Figura 13: Circuito impreso del amplificador.

### Puntos que se pueden mejorar

La disposición de las entradas y salida hacen que la conexión no sea tan sencilla. Por ejemplo la conexión con la salida se hace en el medio del circuito. También resultó ser después de la implementación que un disipador dificultaba el acceso a una de los bornes de las alimentaciones. Hemos visto también que faltaba una pista por un error en el dibujo del esquemático al principio. Para arreglar eso no hubo más remedio que hacer un puente más.

### 3.4.3. Disipadores

Para el calculo de los disipadores se utilizo la ley experimental:

$$\theta_{ja} = \frac{T_{jm} - T_a}{P_D}$$

$$\theta_{ja} = \theta_{jc} + \theta_{cs} + \theta_{sa}$$

En la cual  $\theta_{ja}$  es la resistencia térmica juntura-ambiente. Para cada transistor que maneje altas corrientes se calcula el valor del disipador requerido teniendo en cuenta la potencia disipada y su resistencia térmica. En el caso del transistor del multiplicador  $V_{be}$ , que requiere estar a la misma temperatura que los de la salida clase B, se ubicará en el mismo disipador para disminuir la diferencia de temperaturas entre ellos.



### 3.4.4. Circuito Implementado

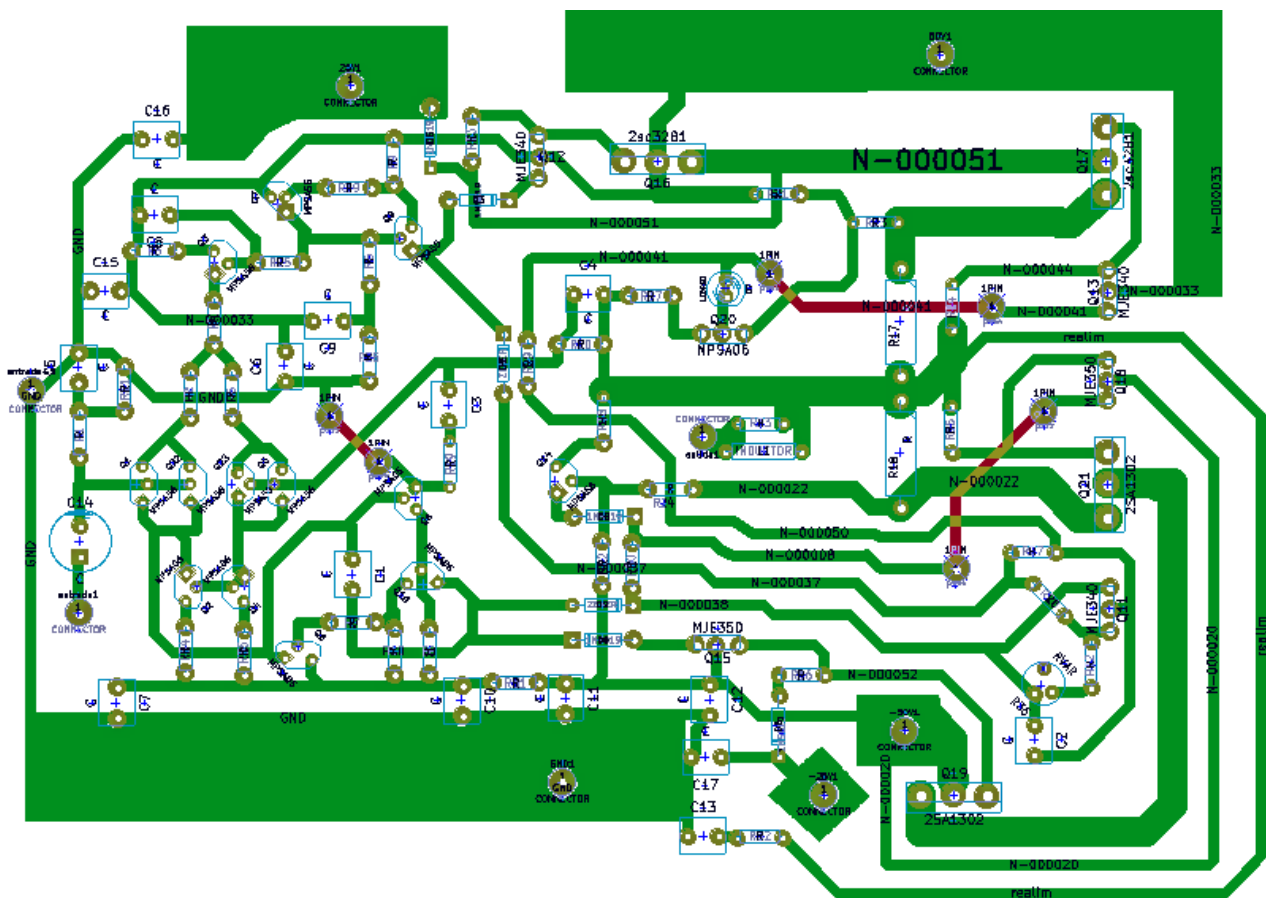


Figura 14: Circuito impreso del amplificador.

### 3.4.5. Fuente Lineal

Para este circuito se utilizaron pistas de 4mm de ancho. Los diodos utilizados en el puente son 6A10 los cuales pueden soportar las corrientes requeridas por el amplificador, ya que soportan hasta 6A; y poseen una caída de tensión en directa menor a 1V. En la Figura 15 se muestra el circuito impreso implementado.

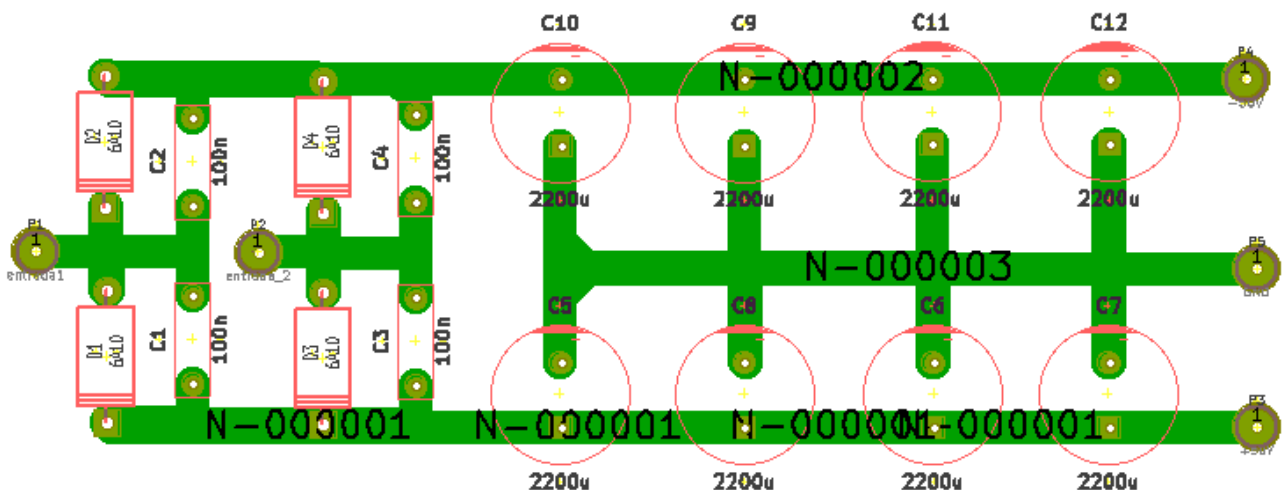


Figura 15: Circuito impreso de la fuente lineal.

### 3.5. Mediciones

#### 3.5.1. Respuesta en Frecuencia

Estas mediciones se realizaron con una carga de  $8\Omega$  .

- Frecuencia de corte inferior: 7,7Hz
- Frecuencia de corte superior: 530KHz

### 3.6. Comparativa Mediciones-Simulaciones

### 3.7. Errores y Modificaciones al Diseño Original

#### 3.7.1. Protecciones contra cortocircuitos

Como se puede ver en la sección 3.1.3 se diseñaron las protecciones utilizando una resistencia en el emisor de los transistores para definir la corriente a la cual estos conducirían. Pero esto es una falla ya que con este diseño los límites de corriente empezarían a depender de la corriente de emisor de las protecciones, disminuyendo la eficiencia de las mismas.

## 4. Conclusiones

## 5. Anexos