



UNIVERSIDAD DE BUENOS AIRES

FACULTAD DE INGENIERÍA

Circuitos Electrónicos II (66.10)

AMPLIFICADOR CLASE G

Informe Final

FECHA: 1 de noviembre de 2015

INTEGRANTES:

Gomez, Cristian	- #89968
<crisgvenezia@gmail.com>	
Pollitzer, Ivan Gustavo	- #22922
<igpollitzer@gmail.com>	
Carballeda, Ignacio	- #91646
<carballeda.ignacio@gmail.com>	

Docentes:

Alberto Bertuccio
Federico D'Angiolo

Índice

1. Introducción	3
1.1. Amplificadores de Potencia	3
1.2. Inicio del desarrollo	6
2. Objetivos	9
3. Especificaciones Propuestas	9
4. Motivación	9
5. Desarrollo	10
5.1. Diseño Propuesto	10
5.2. Cambios al diseño original	11
5.2.1. Doble Multiplicador de V_{be}	11
5.2.2. Etapa de Potencia	11
5.2.3. Entrada Diferencial	11
5.2.4. Fuentes de Corriente	11
5.2.5. Transistores de Salida en Paralelo	11
6. Definiciones y Principales Especificaciones de un Amplificador	12
6.1. Distorsión Armónica Total (THD)	12
6.2. Slew-Rate	12
6.3. Relación Señal a Ruido (SNR)	12
6.4. Fuentes de Ruido Intrínsecas	13
6.4.1. Ruido Térmico o Ruido Johnson	13
6.4.2. Ruido Shot	13
6.4.3. Ruido Popcorn	13
6.5. Offset	13
6.6. Eficiencia	13
6.7. Respuesta en Frecuencia y Ancho de Banda	13
6.8. Sensibilidad	13
6.9. Impedancia de Entrada y Salida	14
7. Simulaciones	15
7.1. Polarización	15
7.2. Ganancia	16
7.2.1. Ganancia Lazo Abierto	16
7.2.2. Ganancia Lazo Cerrado	16
7.3. Respuesta en Frecuencia	16
7.4. Impedancia de Entrada	16
7.5. Impedancia de Salida	16
7.6. Estabilidad	16
7.7. Sensibilidad	17
7.8. Slew-Rate	17
7.9. Distorsión	18

8. Realización del Circuito	19
8.1. Criterios de Diseño en PCB	19
8.2. Disipación de Calor	19
8.3. Circuito Impreso	19
8.4. Fotos	19
9. Mediciones	20
9.1. Polarización	20
9.2. Ganancia	20
9.3. Respuesta en Frecuencia	20
9.4. Impedancia de Entrada	20
9.5. Impedancia de Salida	20
9.6. Slew Rate	20
9.7. THD	20
10. Conclusiones	21
11. Software utilizado	21
12. Bibliografía	21

1. Introducción

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 tensión quede relativamente poco afectada por el valor de la impedancia de carga.

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.

Amplificadores Clase A

Es la clase mas simplificada de un amplificador de potencia, en esta 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 1 se muestra un ejemplo de este tipo de amplificador.

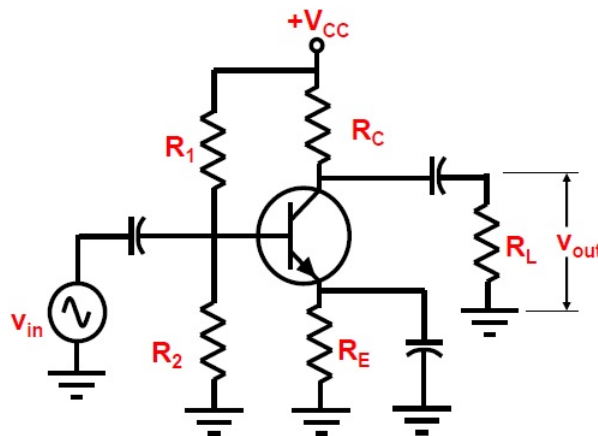


Figura 1: Ejemplo, amplificador clase A

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 útil 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 2.

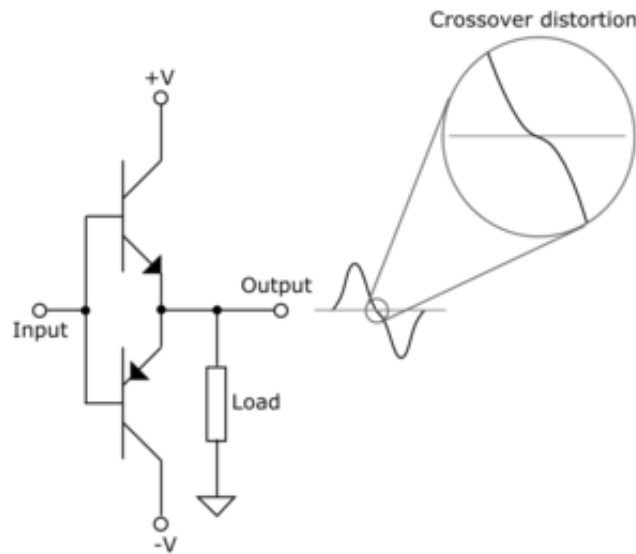


Figura 2: Ejemplo, salida clase B.

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

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.

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 practica los MOSFETS solo disipan potencia cuando se encuentran conduciendo (saturación) debido a la pequeña resistencia de encendido que poseen, de todas maneras esta potencia es despreciable ya que la resistencia de encendido 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.

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 3. 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 4. 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.

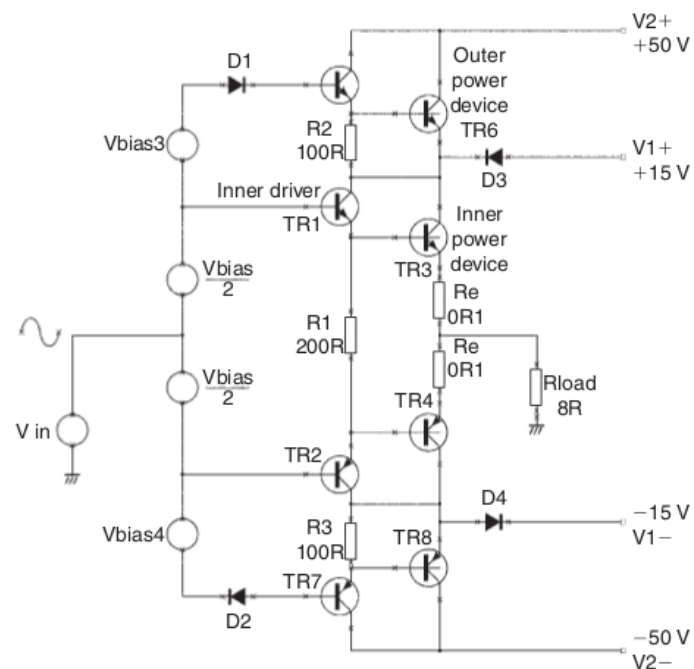


Figura 3: Ejemplo, amplificador clase G.

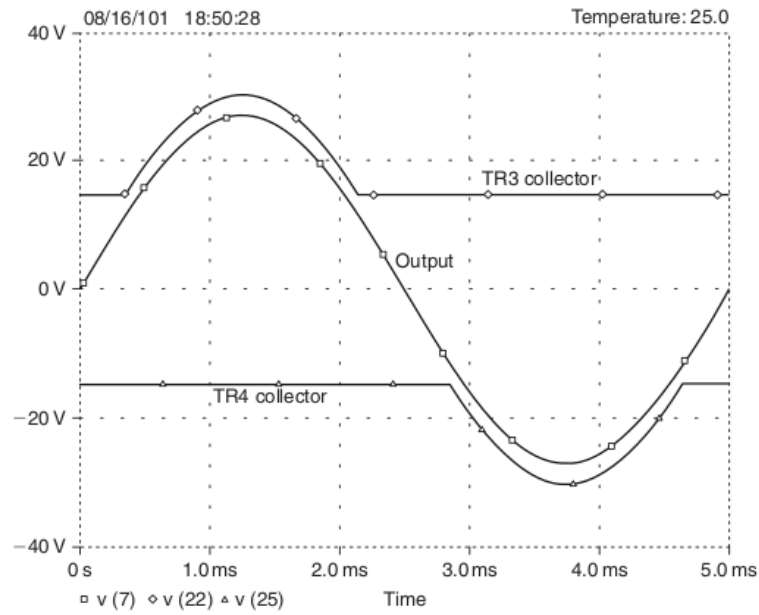


Figura 4: Encendido de fuentes V2 en salidas clase G.

1.2. Inicio del desarrollo

La arquitectura de los amplificadores esta compuesta generalmente de tres etapas principales. La primera etapa consta de una entrada diferencial, en la misma se realimenta negativamente la señal de salida; esta cuenta con un factor de ganancia pequeño. La segunda etapa es de amplificación de tensión (VAS); y por último la etapa de salida que corresponde a un buffer de corriente (ganancia de tensión unitaria).

La lectura del libro de Douglas-Self nos permitió aprender los conceptos básicos y la topología de un amplificador clase G. El siguiente diseño fue tomado directamente del libro y nuestro trabajo se basa en el mismo:

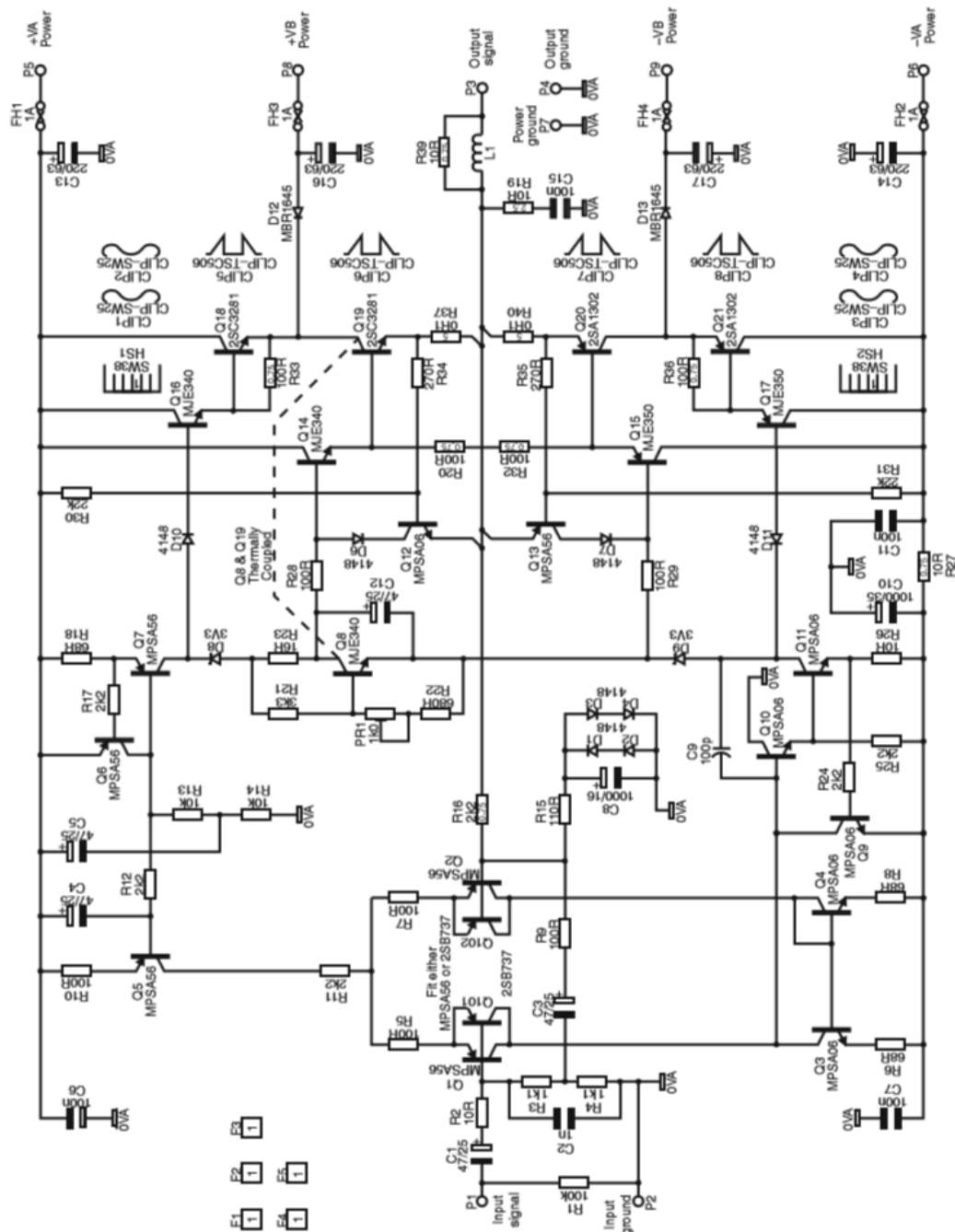


Figura 5: Amplificador clase G , Douglas-Self

En el amplificador propuesto pudimos identificar las partes principales que componen el circuito. Como se observa en el siguiente diagrama en bloques.

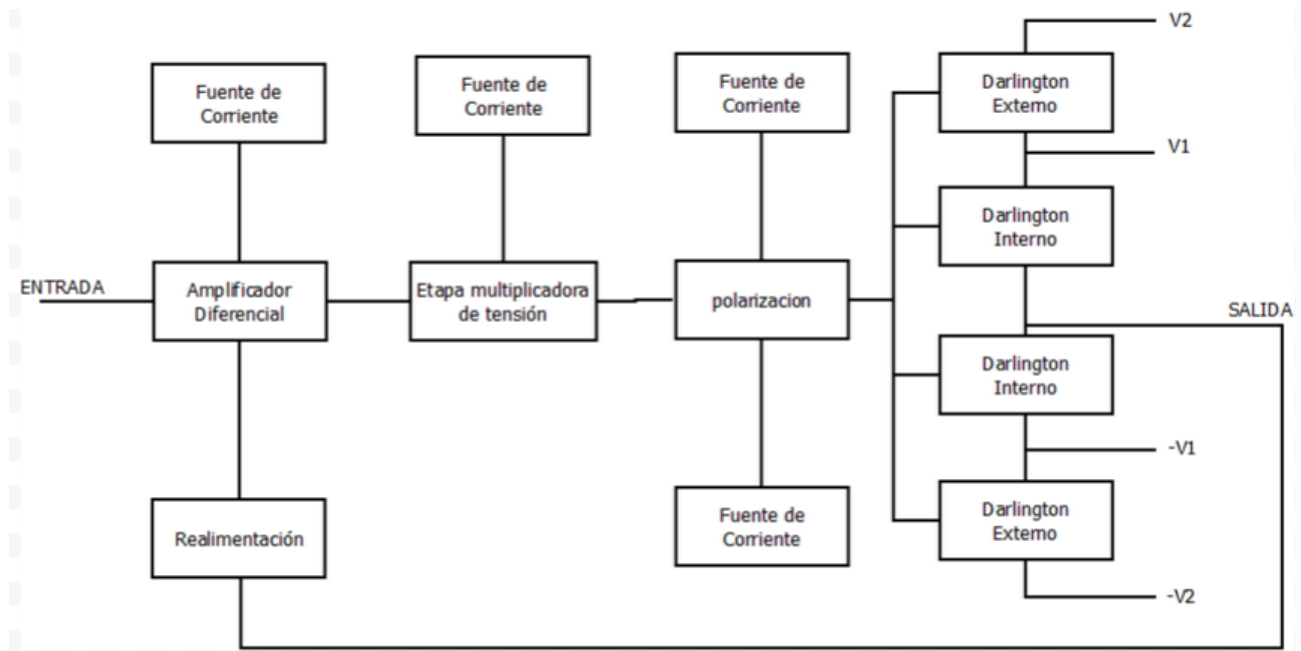


Figura 6: Diagrama en bloques del amplificador clase G

Proponemos diseñar un circuito que incluya las partes que se pudieron identificar como así también cumpla las especificaciones que decidimos.

2. Objetivos

Construir un un amplificador clase G que cumpla con las especificaciones planteadas. Dado que el circuito fue copiado de un libro, lo que se busca principalmente una compresión del mismo y, eventualmente, posibles mejoras.

3. Especificaciones Propuestas

Especificaciones iniciales de diseño:

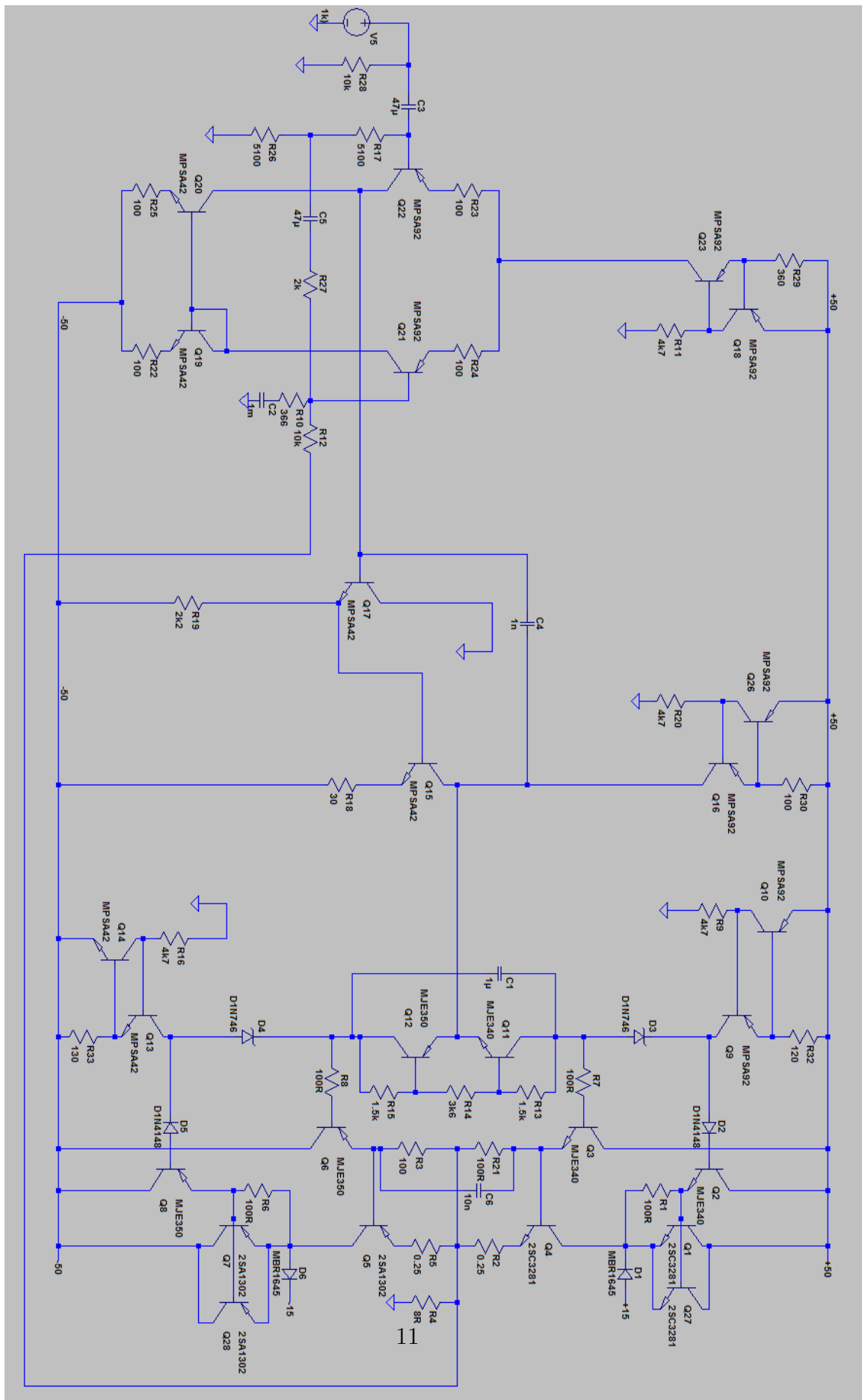
- Máxima Potencia de Salida: 100 W RMS @ 8Ω
- Clase: G
- THD: $< 0,001\%$
- Slew Rate: $> 5V/\mu s$
- Impedancia de entrada: $10\text{ k}\Omega$
- Sensibilidad: 1 V RMS
- Alimentación:
 - Baja tensión: Apróx $+/- 20\text{ V}$
 - Alta tensión: Apróx $+/- 50\text{ V}$

4. Motivación

Un amplificador clase G está compuesto por dos o más niveles de alimentación que permiten incrementar la eficiencia del amplificador con respecto al clase B. Esto se logra ya que con tensiones bajas, se utilizará una fuente de tensión menor, preservando la máxima excursión posible sobre la carga que ofrece un clase B alimentado con la fuente de tensión mayor. Para señales con picos de baja amplitud en relación al valor medio, la mejora en la eficiencia es modesta. Sin embargo, en el caso en que la señal tenga picos considerables con respecto a su valor medio, la mejora es notable.

5. Desarrollo

5.1. Diseño Propuesto



5.2. Cambios al diseño original

5.2.1. Doble Multiplicador de V_{be}

En lugar de un único multiplicador de V_{be} , se usan dos para lograr así una mayor simetría. Esto también ayuda a disminuir el offset que se produce a la salida. En búsqueda de mayor simetría en la etapa de salida nos tomamos la libertad de mover el VAS para ingresar la señal desde el centro. Como consecuencia a esto se debió agregar una fuente de corriente que polarice la etapa de salida inferior. Para evitar modificar la polarización, el VAS debe estar a cero potencial en el punto de conexión con la etapa de salida.

5.2.2. Etapa de Potencia

Esta etapa se modificó agregándole una fuente de corriente propia debido a que no toma la corriente de polarización de la etapa de salida como en el diseño original.

5.2.3. Entrada Diferencial

En el amplificador diferencial se reemplazó la carga resistiva por activa. También se utilizan dos transistores en paralelo en cada rama del par diferencial ya que esto permite disminuir los desapareamientos logrando que el beta equivalente sea más estable. Además, de esta forma se disminuye a la mitad la corriente que circula por los mismos disminuyendo así el ruido shot en esta etapa.

5.2.4. Fuentes de Corriente

Se cambiaron los espejos de corriente por fuentes para que la misma sea invariante ante el ripple en las tensiones de alimentación.

5.2.5. Transistores de Salida en Paralelo

Para reducir la corriente y temperatura en los transistores de potencia, se optó por conectarlos de a pares en paralelo.

6. Definiciones y Principales Especificaciones de un Amplificador

En esta sección se presentan las definiciones de las características relevantes del amplificador que se desean optimizar.

6.1. Distorsión Armónica Total (THD)

La distorsión armónica, o THD, es el cociente entre la suma de las potencias de las componentes armónicas con respecto a la potencia de la frecuencia fundamental que es la que excita al circuito, es decir,

$$THD = \frac{\sum_{i=2}^{+\infty} P_i}{P_1} \quad (1)$$

donde P_i es la potencia de la i -ésima armónica¹. Sin embargo, en audio (y, por ende, la que adopta en presente trabajo) es más común la definición en términos de amplitudes de las armónicas,

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{i=2}^{+\infty} V_i^2}}{V_1} \quad (2)$$

La THD es una medida de la alinealidad de un sistema producida principalmente por la transferencia alineal de las primeras dos etapas y el cruce o conmutación en la etapa de salida.

6.2. Slew-Rate

El Slew-Rate es la máxima velocidad de variación de tensión que puede reproducirse a la salida de un circuito electrónico, o bien,

$$SR = \max \left(\left| \frac{dv_{out}(t)}{dt} \right| \right) \quad (3)$$

Cuando el sistema es excitado por una senoidal, para que la señal de salida no sufra este fenómeno, la frecuencia angular por la tensión pico debe ser menor al Slew-Rate del sistema. De esta manera, se obtiene un ancho de banda para gran señal dado por,

$$f_{\max} = SR / (2\pi V_p) \quad (4)$$

donde f_{\max} es la frecuencia máxima sin deformación para una senoidal de amplitud V_p a la salida del circuito y SR es el Slew-Rate del circuito. Se debe a que la corriente disponible para cargar al capacitor de la etapa amplificadora de tensión es limitada.

6.3. Relación Señal a Ruido (SNR)

La relación señal a ruido² o SNR es una medida de la potencia de la señal útil con respecto al nivel de ruido que produce el sistema y se expresa mediante,

$$SNR = \frac{P_S}{P_N} \quad (5)$$

Es deseable obtener una SNR elevada.

¹Se tomó como convención que la primera armónica es la frecuencia fundamental.

²Se considerará ruido a toda señal no deseada en el circuito.

6.4. Fuentes de Ruido Intrínsecas

En esta subsección se analizan los distintos tipos de ruidos presentes en el amplificador.

6.4.1. Ruido Térmico o Ruido Johnson

Es producido por los movimientos aleatorios de los electrones en componentes que disipan energía (resistores, transistores).

6.4.2. Ruido Shot

Es el ruido asociado a la circulación de corriente a través de una barrera de potencial y es proporcional a la corriente en continua que circula. Por lo tanto, para reducir este tipo de ruido es necesario mantener la corriente DC lo más pequeña posible.

6.4.3. Ruido Popcorn

Asociado a deficiencias en el proceso de fabricación de semiconductores. En el diseño no se tiene control sobre este tipo de ruido.

6.5. Offset

La presencia de desapareamientos en los componentes, en especial en los transistores del par diferencial de entrada, y los corrimientos con la temperatura, pueden producir tensiones a la salida incluso en la ausencia de una señal de entrada. Esto es importante ya que limita la resolución del amplificador. Es posible representar el efecto de todos estos desapareamientos a los efectos de la entrada del amplificador mediante dos cantidades: la tensión de offset y la corriente de offset. Resulta importante escoger los transistores del par diferencial con características muy similares, es decir, con valores de β y V_{BE} aproximadamente iguales.

6.6. Eficiencia

La eficiencia de un amplificador se define como el cociente entre la potencia media entregada a la carga y la potencia media que entregan las fuentes de alimentación, es decir,

$$\eta = \frac{P_{CARGA}}{P_{FUENTES}} \quad (6)$$

6.7. Respuesta en Frecuencia y Ancho de Banda

La ganancia en función de la frecuencia de la señal que excita al sistema se denomina respuesta en frecuencia del circuito. Idealmente, el amplificador de audio debería presentar una ganancia constante para el rango de frecuencias del espectro audible, es decir, entre los 20 Hz y los 20 kHz. La frecuencia para la cual la ganancia cae 3 dB con respecto al valor en la banda mencionada, determina el ancho de banda del amplificador.

6.8. Sensibilidad

Es la máxima amplitud de la tensión de entrada para la cual la salida amplificada no recorta.

6.9. Impedancia de Entrada y Salida

Impedancia de Entrada

Es la impedancia equivalente que vería un generador aplicado a la entrada del amplificador. Para el caso particular de este tipo de amplificador (de tensión) buscamos que sea relativamente alta y no cargue a la etapa anterior. Claramente depende de la frecuencia de operación pero un valor típico para el rango de audiofrecuencias es de $10\text{K } \Omega$.

Impedancia de Salida

Es la impedancia equivalente que vería un generador aplicado a la salida del amplificador. En el caso particular del amplificador de audio buscamos que sea muy baja dado que las cargas son relativamente bajas y de lo contrario nos acortarían la amplitud de la señal de salida. Claramente depende de la frecuencia de operación pero un valor típico para el rango de audiofrecuencias es de décimas o centésimas de Ω .

7.2. Ganancia

7.2.1. Ganancia Lazo Abierto

$$A_{ol} = xx \text{ dB}$$

7.2.2. Ganancia Lazo Cerrado

$$A_{cl} = 29,37 \text{ dB}$$

7.3. Respuesta en Frecuencia

Ancho de banda (caída 3 dB) es de 33 kHz

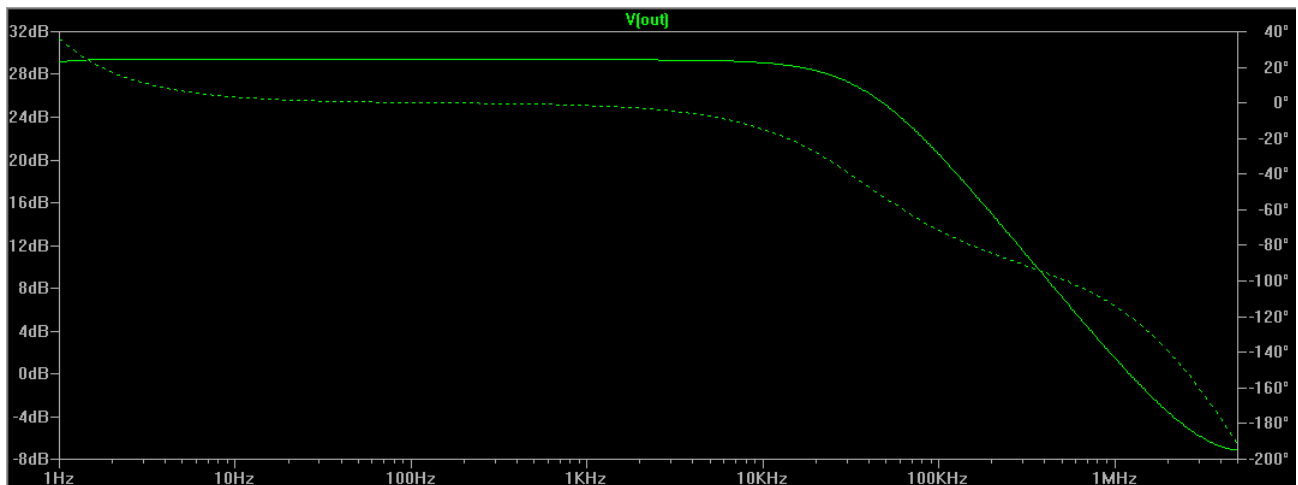


Figura 9: Ancho de Banda

7.4. Impedancia de Entrada

Se estimo dividiendo la tensión del generador por su corriente. El resultado a 1 kHz fue de aproximadamente 7 k Ω .

7.5. Impedancia de Salida

Se pasivo el generador de señal y se coloco una fuente en la salida desacoplada por un capacitor. Realizando el mismo procedimiento que en el punto anterior, se estima una impedancia de salida de aproximadamente 480 m Ω (a una frecuencia de 1 kHz)

7.6. Estabilidad

Cuando la ganancia es de 0 dB la fase es de -118° , esto sucede a 1,21 MHz. El margen de fase (MF), es entonces de 62° , teniendo de esta forma un sistema estable.

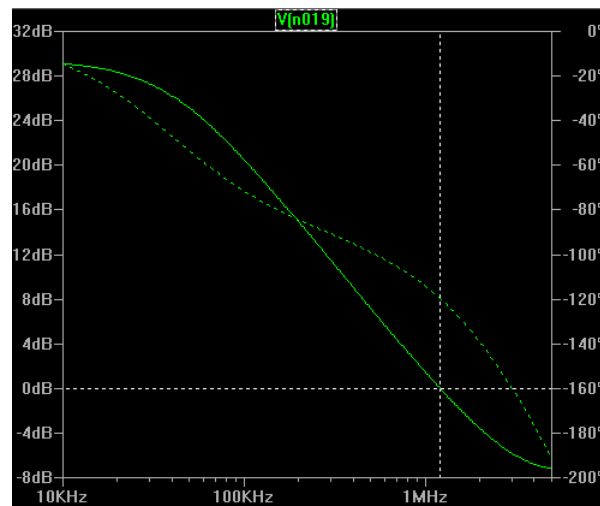


Figura 10: Estabilidad

7.7. Sensibilidad

Para lograr 40 V a la salida se necesitaron 1,35 V en la entrada.

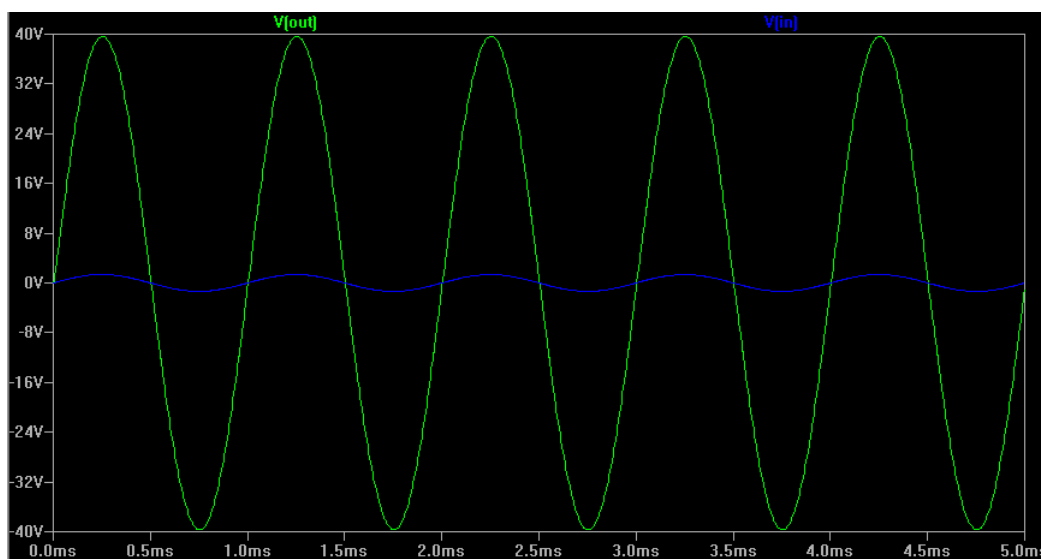


Figura 11: sensibilidad

7.8. Slew-Rate

Para simular el slew-rate se puso una señal cuadrada en la entrada del amplificador, luego, se tomaron dos puntos en la salida con los cuales se calculó la pendiente. Se obtuvo un slew-rate de $1,82 \frac{\text{V}}{\mu\text{s}}$.

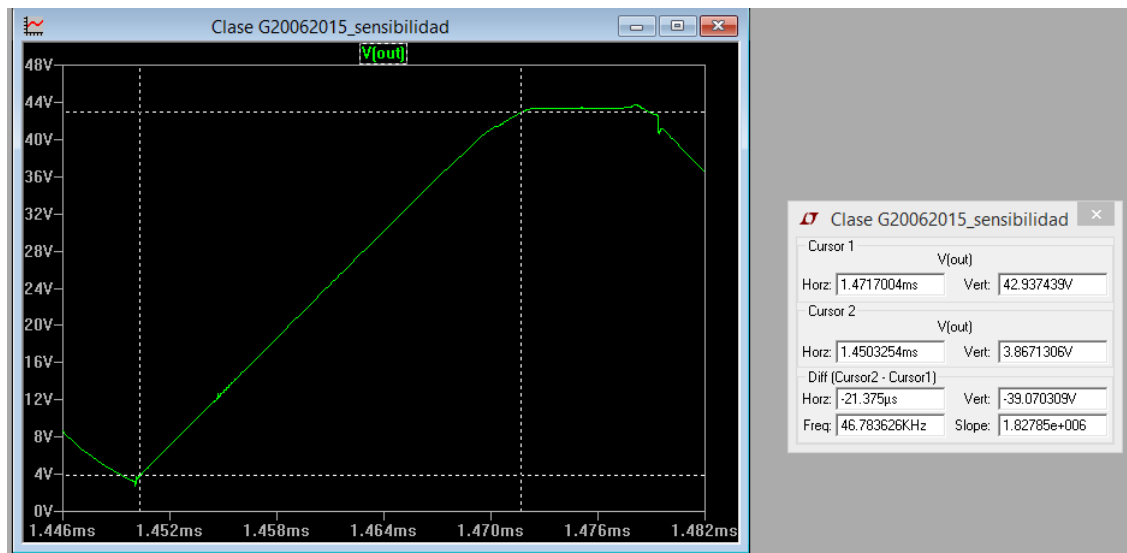


Figura 12: Slew-Rate

7.9. Distorsión

El THD a lazo cerrado frecuencia 1 kHz y 1,35 V pico resultó ser de THD=0,002 %. Con la misma entrada y a una frecuencia de 10 kHz THD=0,005 %

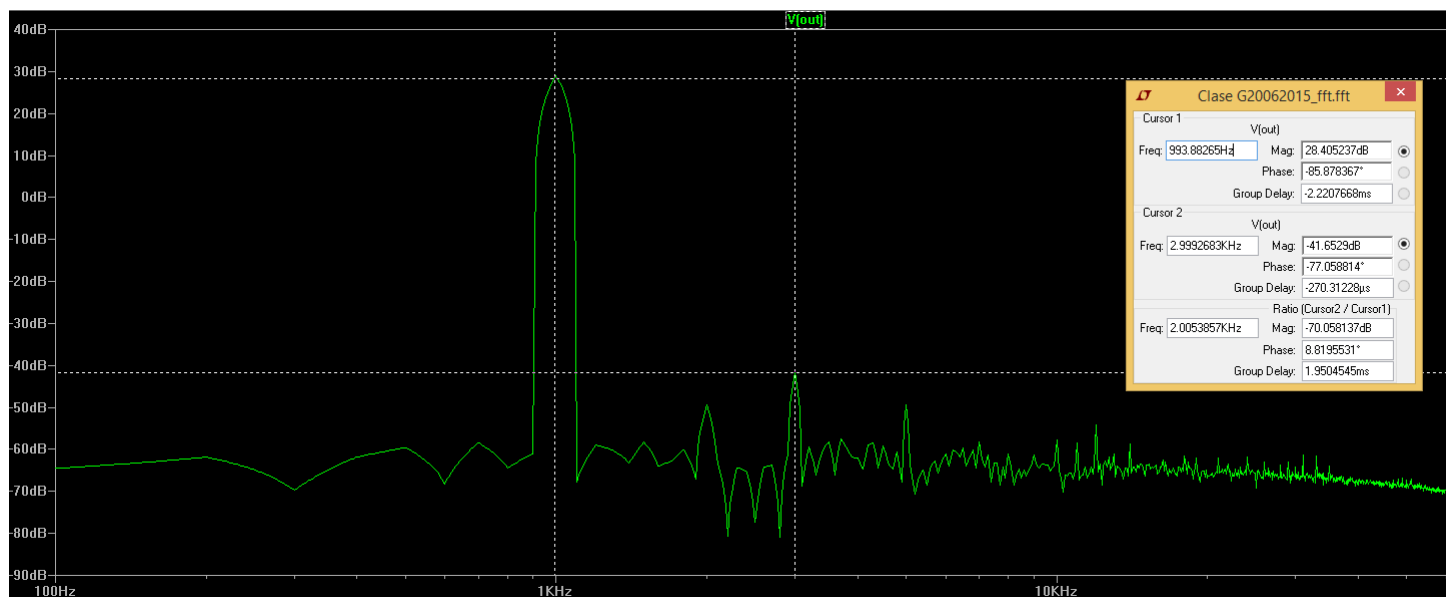


Figura 13: fft

8. Realización del Circuito

8.1. Criterios de Diseño en PCB

8.2. Disipación de Calor

8.3. Circuito Impreso

8.4. Fotos

9. Mediciones

9.1. Polarización

9.2. Ganancia

9.3. Respuesta en Frecuencia

9.4. Impedancia de Entrada

9.5. Impedancia de Salida

9.6. Slew Rate

9.7. THD

10. Conclusiones

11. Software utilizado

- KiCad - Diseño PCB
- LTSpice - Simulación
- L^AT_EX- Confección del informe
- Github - Control de versiones

12. Bibliografía

- Designing Audio Power Amplifiers - Bob Cordell
- Audio Power Amplifier Design Handbook - Douglas Self