



**FACULTAD
DE INGENIERIA**

Universidad de Buenos Aires

CIRCUITOS ELECTRÓNICOS II - 66.10
DISEÑO DE CIRCUITOS ELECTRÓNICOS - 86.10

Trabajo práctico final

Diseño y construcción de un amplificador clase G - mediciones

Alumnos:

LUNA Diego

diegorluna@gmail.com

NEUMARKT FERNÁNDEZ Leonardo

leoneu928@gmail.com

RIZZO Gonzalo Gabriel

gonzalorizzo95@gmail.com

Padrón N° 75451

Padrón N° 97471

Padrón N° 96772

Docentes:

Ing. BERTUCCIO José Alberto

Ing. MARCHI Edgardo

Ing. BULACIO Matías

Ing. D'ANGIOLO Federico

Ing. GAMEZ Pablo

12 de Diciembre de 2019

Índice

Índice	I
1. Consideraciones previas al diseño	1
1.1. Objetivo y requerimientos de usuario	1
1.2. Especificaciones	1
2. Diseño circuital	2
2.1. Circuito Pre-amplificador	2
2.2. Fuente <i>Switching</i>	2
2.3. Circuito amplificador	4
3. Simulaciones	8
3.1. Polarización	8
3.2. Ganancia de lazo	10
3.3. Ancho de banda	12
3.4. Ancho de banda de potencia	14
3.5. Impedancias de entrada y salida	16
3.6. THD	19
3.7. Slew Rate	21
4. Mediciones	24
4.1. Polarización	24
4.2. Ancho de banda	25
4.3. Ancho de banda de potencia	25
4.4. Potencia	25
4.5. Sensibilidad	25
4.6. Slew Rate	25
4.7. THD	25
5. Observaciones y conclusiones	26
6. Bibliografía	27
Apéndices	29
A. Hojas de datos	29
A.1. BD135	29
A.2. BD136	29
A.3. BC556	29
A.4. MJL21193	29
A.5. MJL21194	29
A.6. 1N4148	30
A.7. 1N4370	30

A.8. 1N4007	30
A.9. 1N5822	30
A.10.Metal film resistor	30
A.11.Carbon film resistor	30
A.12.Ceramic capacitor	31
A.13.Electrolytic Aluminum capacitor	31

Índice de figuras

2.1. Circuito pre-amplificador	2
2.2. Circuito <i>Step Down</i>	3
2.3. Circuito <i>Step Up</i>	3
2.4. PCB de la fuente Switching	4
2.5. Vista 3D de la fuente Switching	4
2.6. Esquemático de amplificador con clase G	5
2.7. PCB del amplificador	6
2.8. Vista superior del PCB a implementar	6
2.9. Vista inferior del PCB a implementar	7
3.1. Circuito simulado mostrando los valores de polarización.	9
3.2. Ganancia de lazo (simulación).	11
3.3. Ancho de banda a baja potencia (simulación).	13
3.4. Ancho de banda de potencia (simulación).	15
3.5. Valores de impedancia de entrada (simulación).	17
3.6. Valores de impedancia de salida (simulación).	18
3.7. THD en función de la frecuencia (simulación).	19
3.8. THD en función de la potencia (simulación).	20
3.9. Tiempo de crecimiento (simulación).	22
3.10. Tiempo de crecimiento, zoom sobre la pendiente (simulación).	23

Índice de cuadros

3.1. Punto de reposo de los transistores y máxima potencia disipada en operación.	8
4.1. Primer punto de operación.	24
4.2. Segundo punto de operación.	24

1. Consideraciones previas al diseño

1.1. Objetivo y requerimientos de usuario

El objetivo del presente trabajo es armar un circuito amplificador que amplifique una señal de audio que será reproducida en un Baffle (asumimos respuesta resistiva pura en todo el ancho de banda). Debe proveer al usuario con una buena calidad de sonido (algo subjetivo, no obstante acá solo se consideran medidas reales) con volumen alto, sin consumir mucha más energía de la necesaria, ni ser muy grande y pesado. Es decir, debe tener baja distorsión (THD), alta relación señal-ruido (SNR), eficiencia razonable y buena potencia máxima de salida.

1.2. Especificaciones

A continuación se enumeran las especificaciones que fueron tenidas en consideración para la implementación del amplificador de audio.

- Máxima Potencia de Salida: $\geq 40WRMS@8\Omega$
- Salida clase **G**
- THD: $< 0,1\%@1kHz$, $< 0,2\%@10kHz$, a $40WRMS@8\Omega$
- Slew-Rate: $> 5 \frac{V}{\mu S}$
- Impedancia de entrada: $> 21k\Omega$
- Sensibilidad: $1,1V \text{ pico } @8\Omega$
- Ancho de banda: $10Hz \rightarrow 50kHz$
- Factor de amortiguamiento: > 100
- Ancho de banda de potencia: $> 30kHz$
- Alimentación:
 - Baja tensión: $\pm 15V$ nominal (desde transformador de $10V + 10V$), ripple máximo 10%
 - Alta tensión: $\pm 35V$ nominal (desde fuente switching implementada de $15V + 15V$ más fuente de alimentación de $25V + 25V$), ripple máximo 10%
- Máxima excursión: 25V

2. Diseño circuital

2.1. Circuito Pre-amplificador

El circuito pre-amplificador consta de un integrado TL072 con una configuración de realimentación paralelo-serie, que tiene como fin, amplificar la señal de entrada para ser tratada mediante los filtros siguientes al capacitor C12.

Los filtros tienen como fin disminuir el volumen de las frecuencias bajas o altas a modo de incluir una etapa de procesamiento de señal al proyecto. Esto se logra con los potenciómetros incluidos en la placa, para que el procesamiento sea de fácil manejo.

Por último, se utiliza un divisor resistivo para controlar el volumen del amplificador en conjunto.

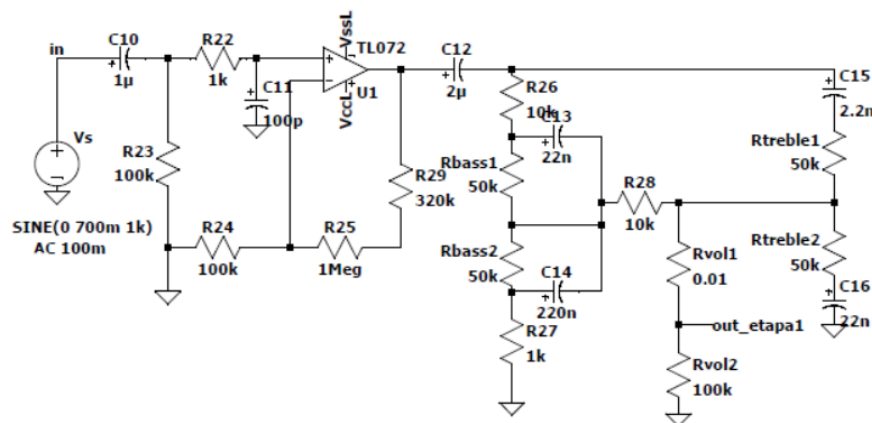


Figura 2.1: Circuito pre-amplificador

2.2. Fuente Switching

El circuito amplificador se alimenta con 4 tensiones diferentes, las cuales son $+35V$, $+15V$, $-35V$ y $-15V$, para ello se diseñaron dos fuentes switching, una *step down* para bajar de $35V$ a $15V$ y una *step up* para subir de $-35V$ a $-15V$.

A partir de las hojas de datos de los reguladores **LM2576** y **LM2577**, en configuraciones indicadas para entregar las alimentaciones correspondientes. Se implementaron los siguientes circuitos tomados de las hojas de datos:

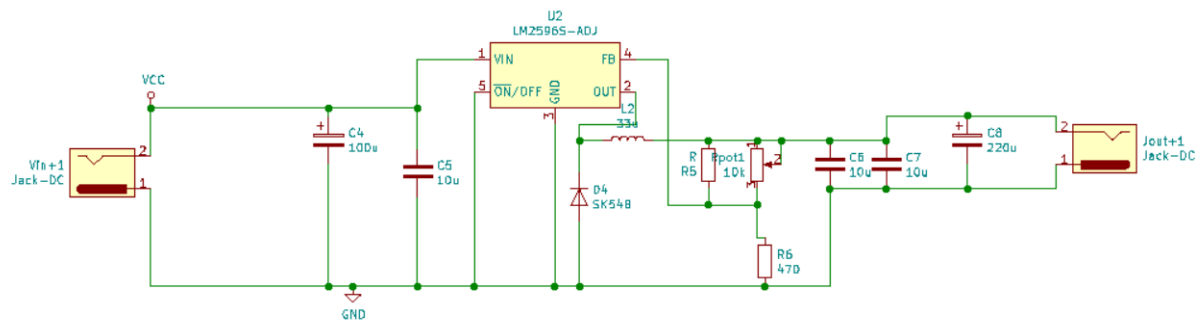


Figura 2.2: Circuito *Step Down*

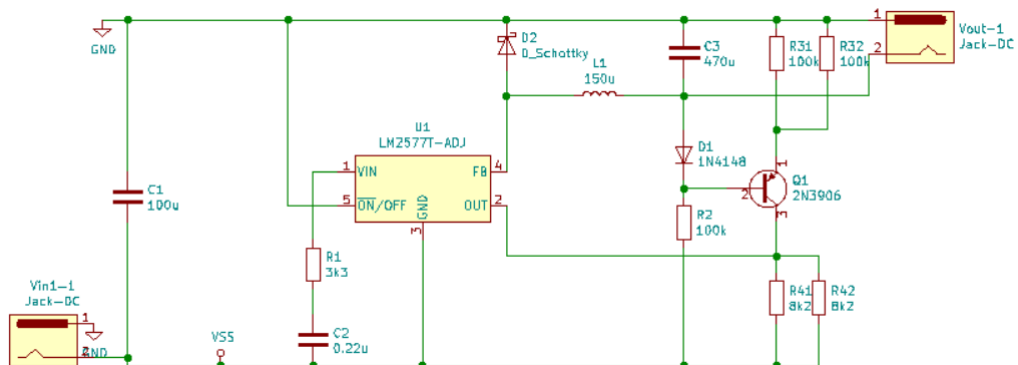


Figura 2.3: Circuito *Step Up*

Luego se diseñó el PCB de la fuente Switching en *Kicad* a partir de los circuitos mencionados, el resultado se puede observar a continuación:

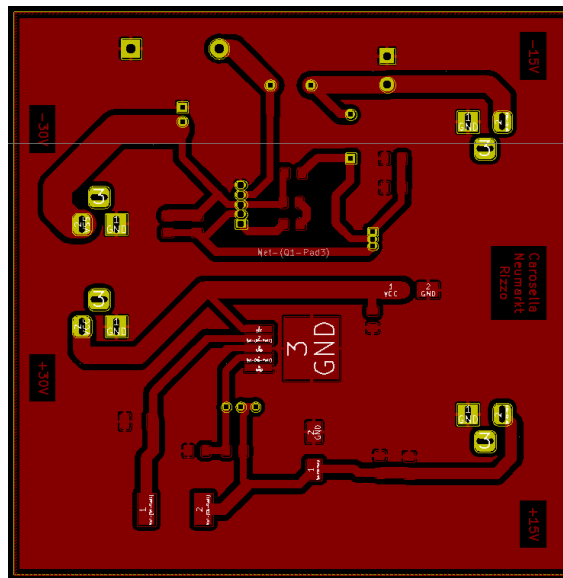


Figura 2.4: PCB de la fuente Switching

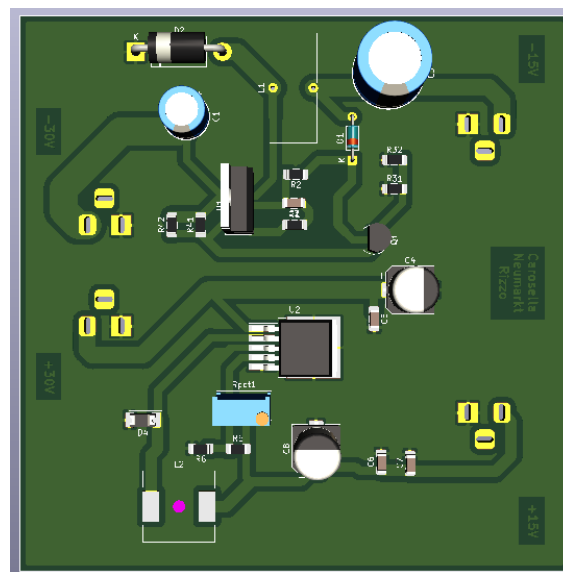


Figura 2.5: Vista 3D de la fuente Switching

2.3. Circuito amplificador

A continuación, se muestran el esquemático del circuito implementado en *Kicad*. En primer lugar, en la figura 2.6 muestra el amplificador principal clase G diseñado junto con el circuito de pre-amplificador. Luego se prosiguió por realizar el diseño del PCB. Para ello se aplicó un plano de masa en la capa superior de la placa. Por otro lado se utilizaron pistas anchas y cortas, de un espesor de 60 a 118 mils, y separaciones entre pistas

mayores a 12 mils. A continuación se muestran imágenes del PCB para el amplificador clase G a implementar:

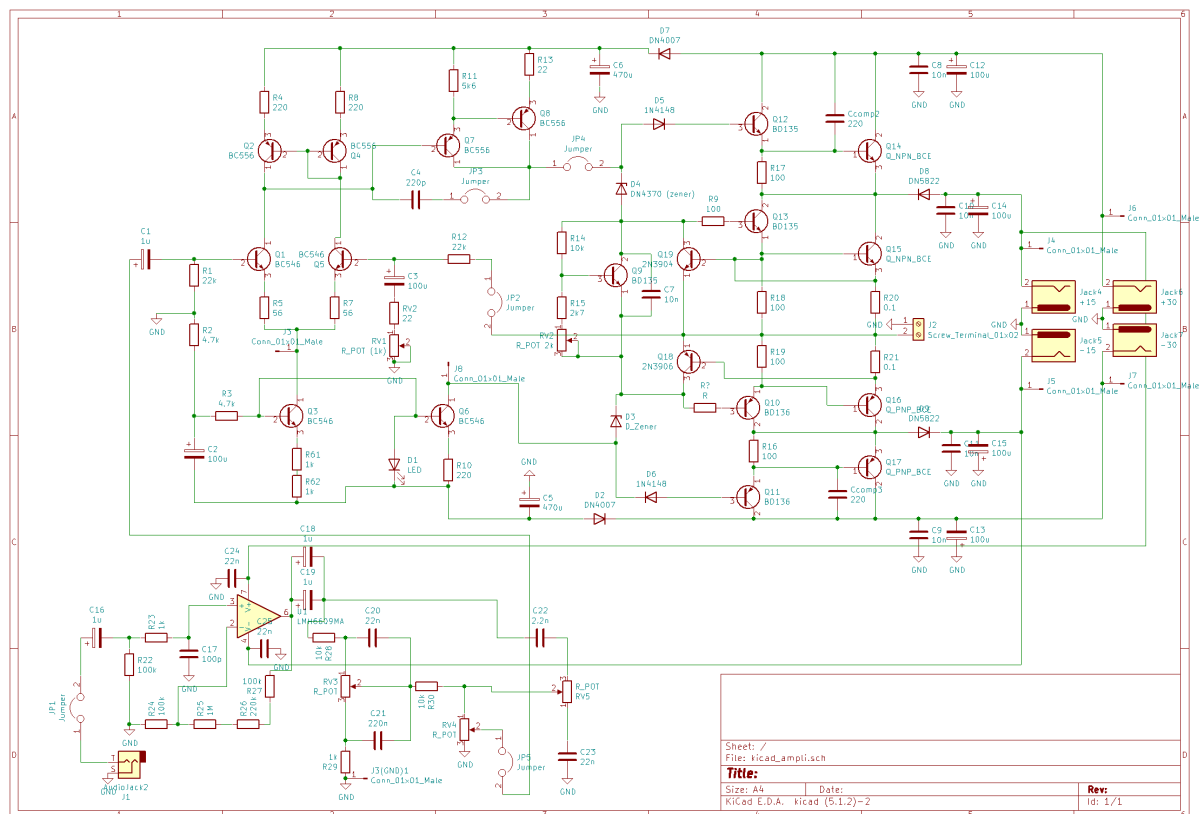


Figura 2.6: Esquemático de amplificador con clase G

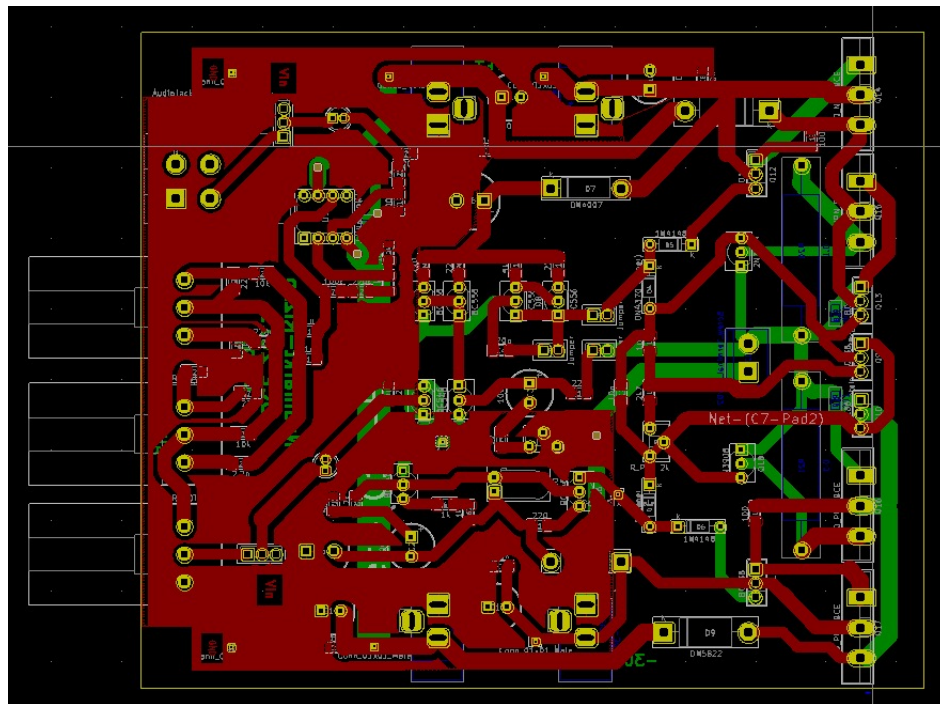


Figura 2.7: PCB del amplificador

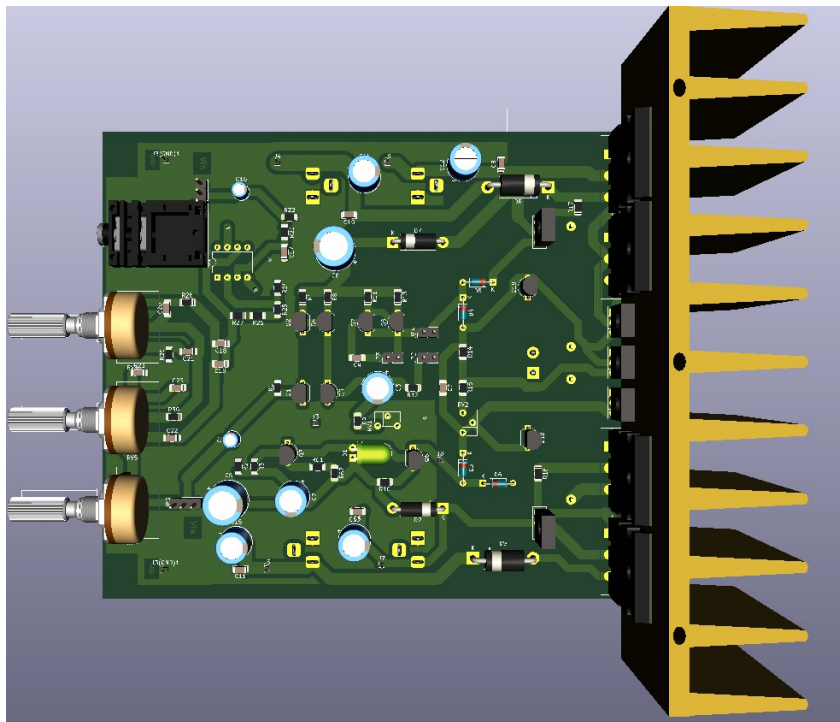


Figura 2.8: Vista superior del PCB a implementar

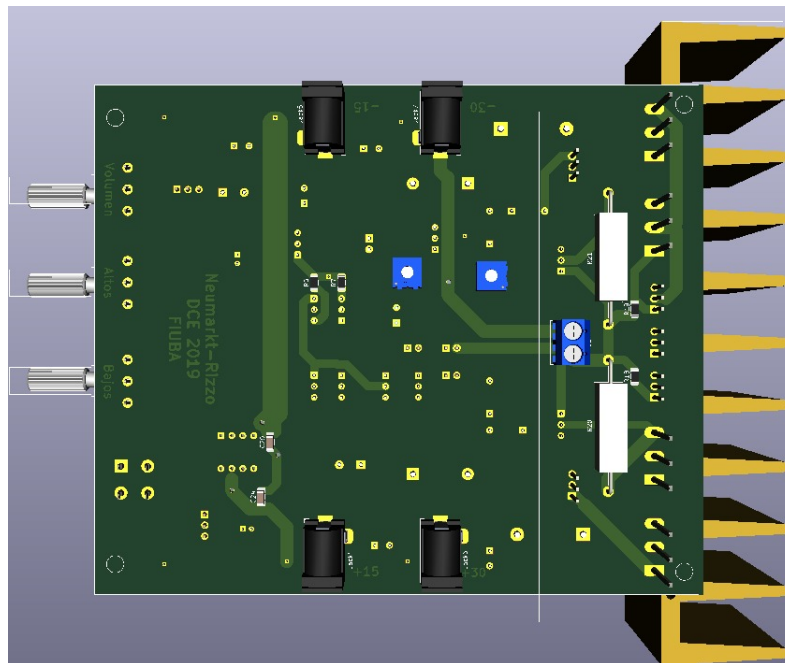


Figura 2.9: Vista inferior del PCB a implementar

3. Simulaciones

3.1. Polarización

Se simularon los valores en reposo de los transistores de la etapa amplificadora clase G, junto con la máxima potencia disipada en cada uno. Los resultados se muestran en el cuadro [3.1]

Transistor	V_{BEQ}	V_{CEQ}	I_{CQ}	P_Q
Q_1 (BC546C)	612mV	33,87V	549μA	18,6mW
Q_2 (BC556B)	-610mV	-1,31V	549μA	722μW
Q_3 (BC546B)	631mV	31,78V	1,1mA	35mW
Q_4 (BC556B)	-610mV	33,78V	549μA	334mW
Q_5 (BC546B)	612mV	34,6V	549μA	19mW
Q_6 (BC546B)	693mV	28,8V	9,71mA	280mW
Q_7 (BC556B)	-557mV	30V	170μA	5mW
Q_8 (BC556B)	-669mV	30,71V	9,57mA	294mW
Q_9 (BD135)	676mV	2,96V	9,40mA	28mW
Q_{10} (BD136)	-722mV	13,9V	15mA	208mW
Q_{11} (BD136)	10,95V	20,32V	31pA	1,1anoW
Q_{12} (BD135)	-10,93V	20,32V	31pA	1,1anoW
Q_{13} (BD135)	693mV	13,88V	18,9mA	263mW
Q_{14} (MJL21194)	1,04mV	20,32V	26pA	522pW
Q_{15} (MJL21194)	722mV	14,6V	714mA	10,43W
Q_{16} (MJL21193)	-678mV	14,6V	718mA	10,49W
Q_{17} (MJL21193)	-986mV	20,32V	1,76pA	459pW
Q_{18} (2N3906)	-72mV	1,47V	1,47pA	2,2pW
Q_{19} (2N3904)	72mV	1,48V	1,58pA	2,3pW

Cuadro 3.1: Punto de reposo de los transistores y máxima potencia disipada en operación.

En la figura [3.1] se pueden verificar los resultados de la simulación con las referencias en el circuito pertinente.

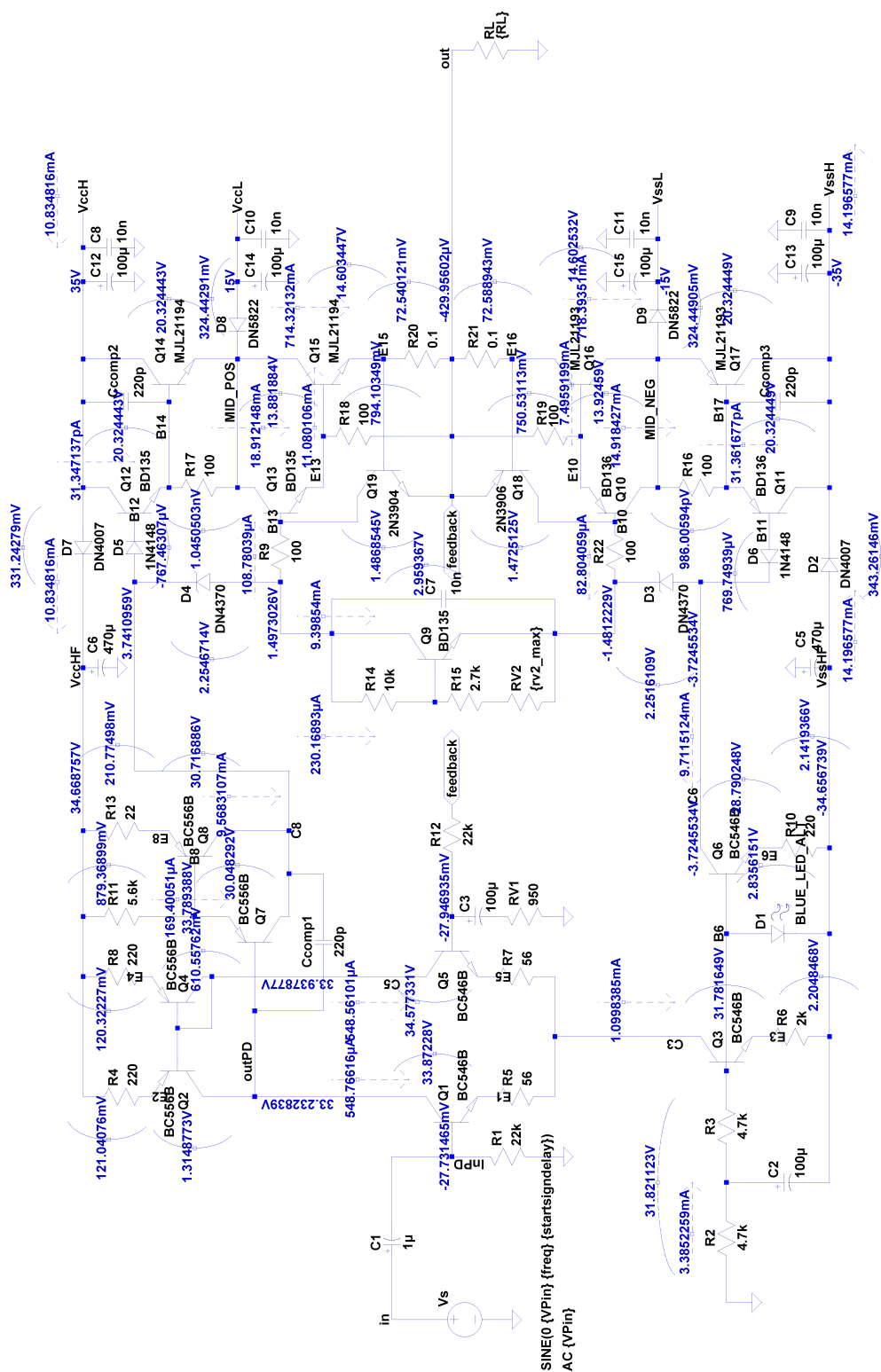


Figura 3.1: Circuito simulado mostrando los valores de polarización.

3.2. Ganancia de lazo

En la figura [3.2] se puede observar la ganancia de lazo del circuito, simulado a distintas frecuencias. A su vez, se especifica el margen de ganancia y de fase, para verificar la correcta estabilización del circuito. Obteniéndose de este modo:

- Margen de ganancia: 29,21dB
- Margen de fase: 86,12°

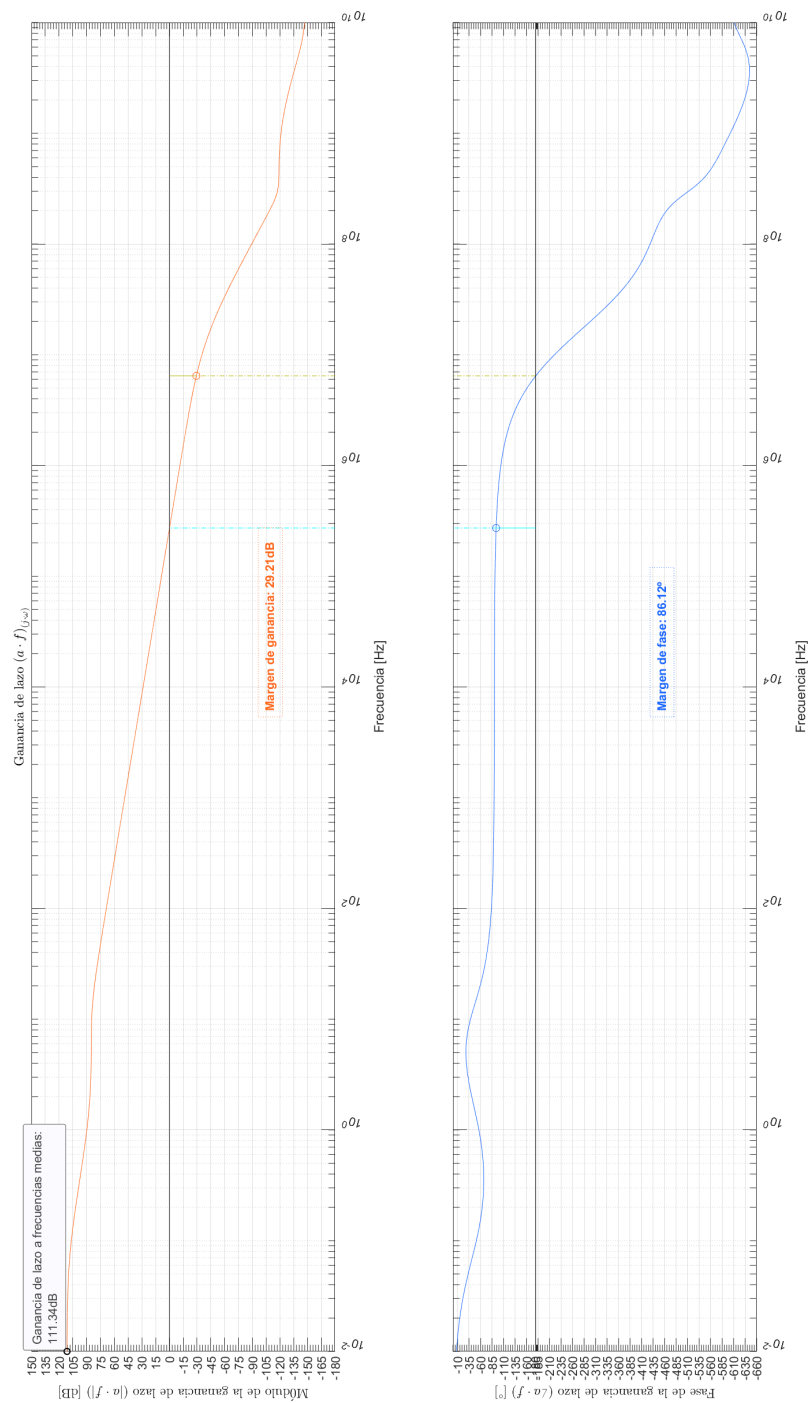


Figura 3.2: Ganancia de lazo (simulación).

3.3. Ancho de banda

En la figura [3.3] se muestra el resultado de la simulación del ancho de banda del circuito. Obtenemos un ancho de banda de $97,89kHz$ con frecuencias de corte:

- $f_l = 22,34Hz$
- $f_h = 97,92kHz$

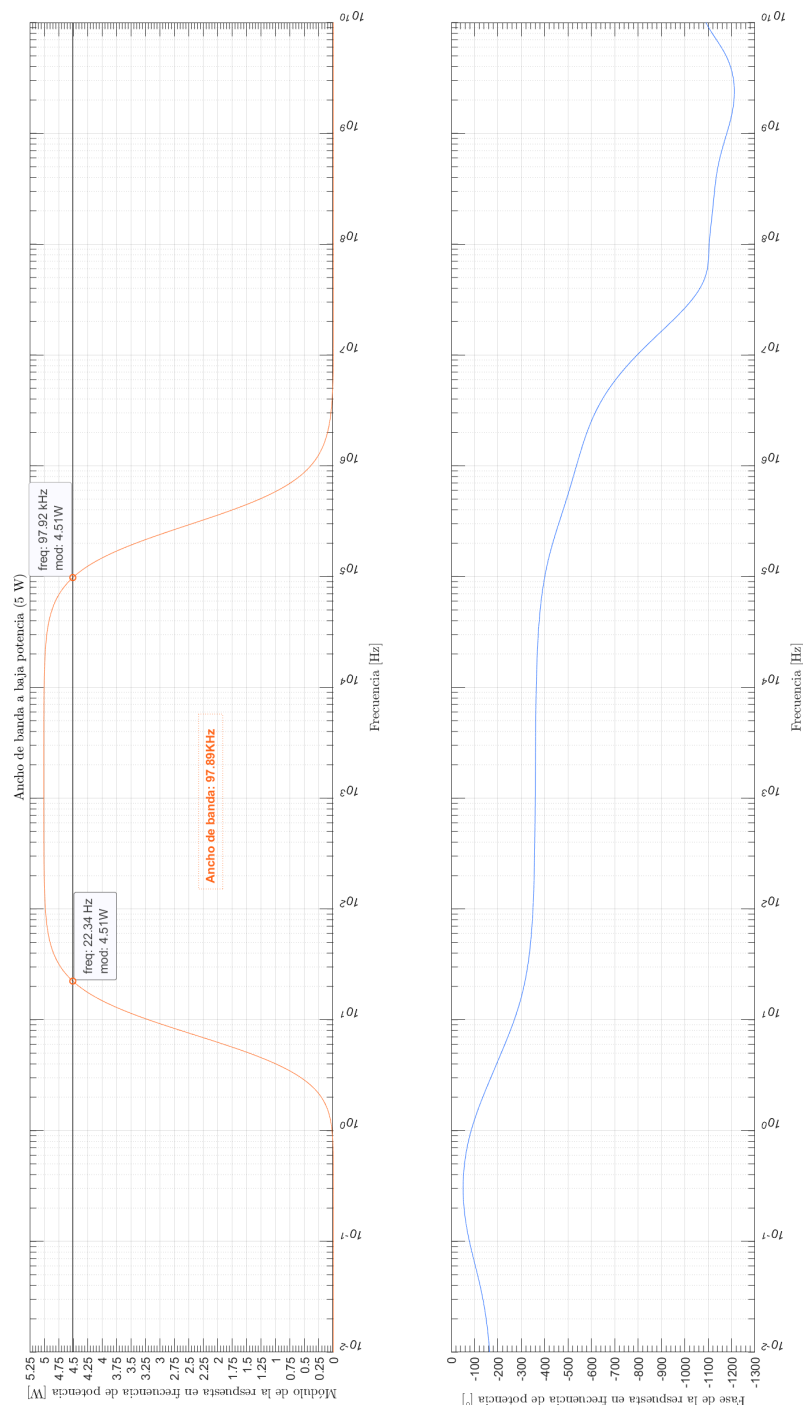


Figura 3.3: Ancho de banda a baja potencia (simulación).

3.4. Ancho de banda de potencia

En la figura [3.4], se observa el resultado de la simulación del ancho de banda de potencia simulado. Obtenemos en el circuito un ancho de banda de potencia de $97,89kHz$ con frecuencias de corte:

- $f_l = 22,34Hz$
- $f_h = 97,84kHz$

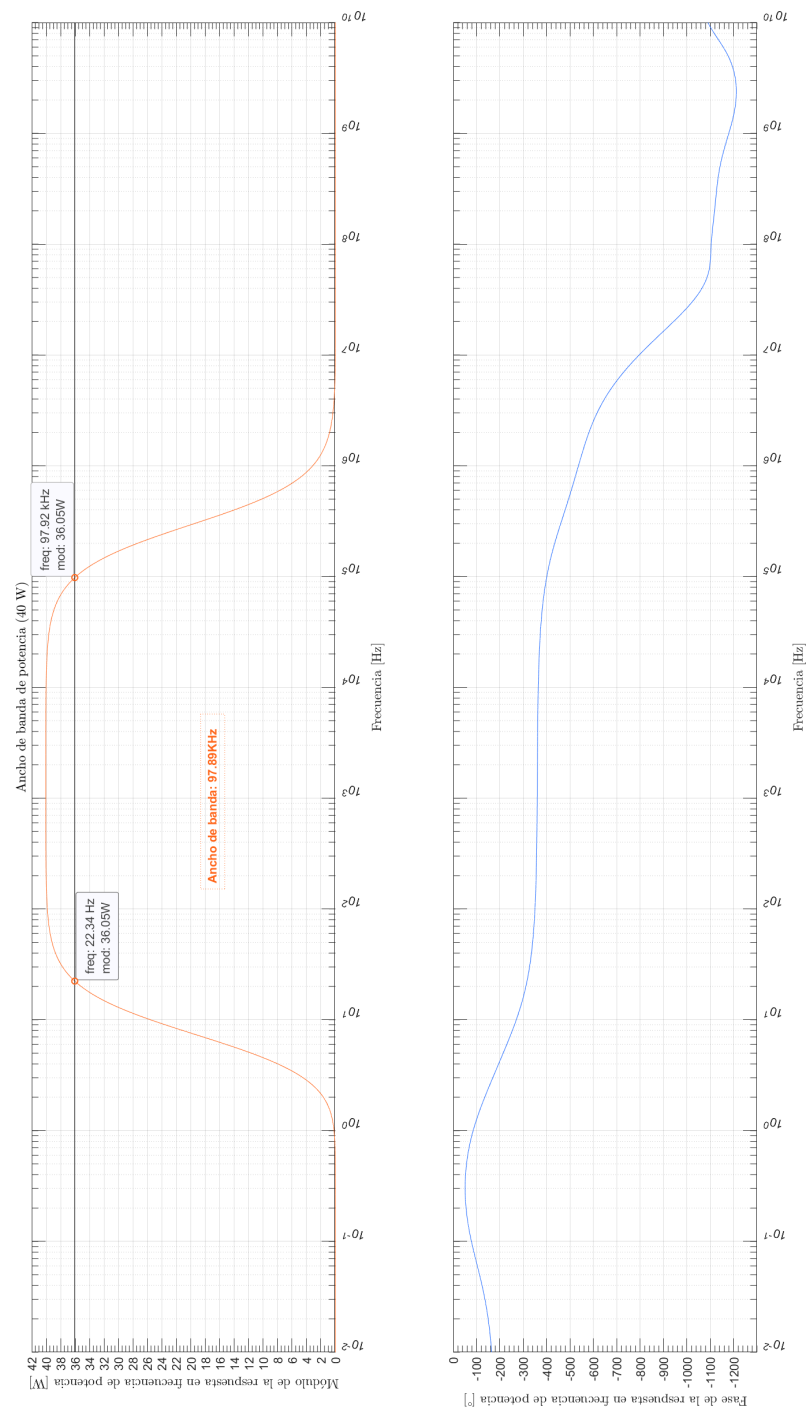


Figura 3.4: Ancho de banda de potencia (simulación).

3.5. Impedancias de entrada y salida

En las figuras [3.5] y [3.6], se observa los valores de la resistencia de entrada y salida del amplificador, respectivamente, en función de la frecuencia.

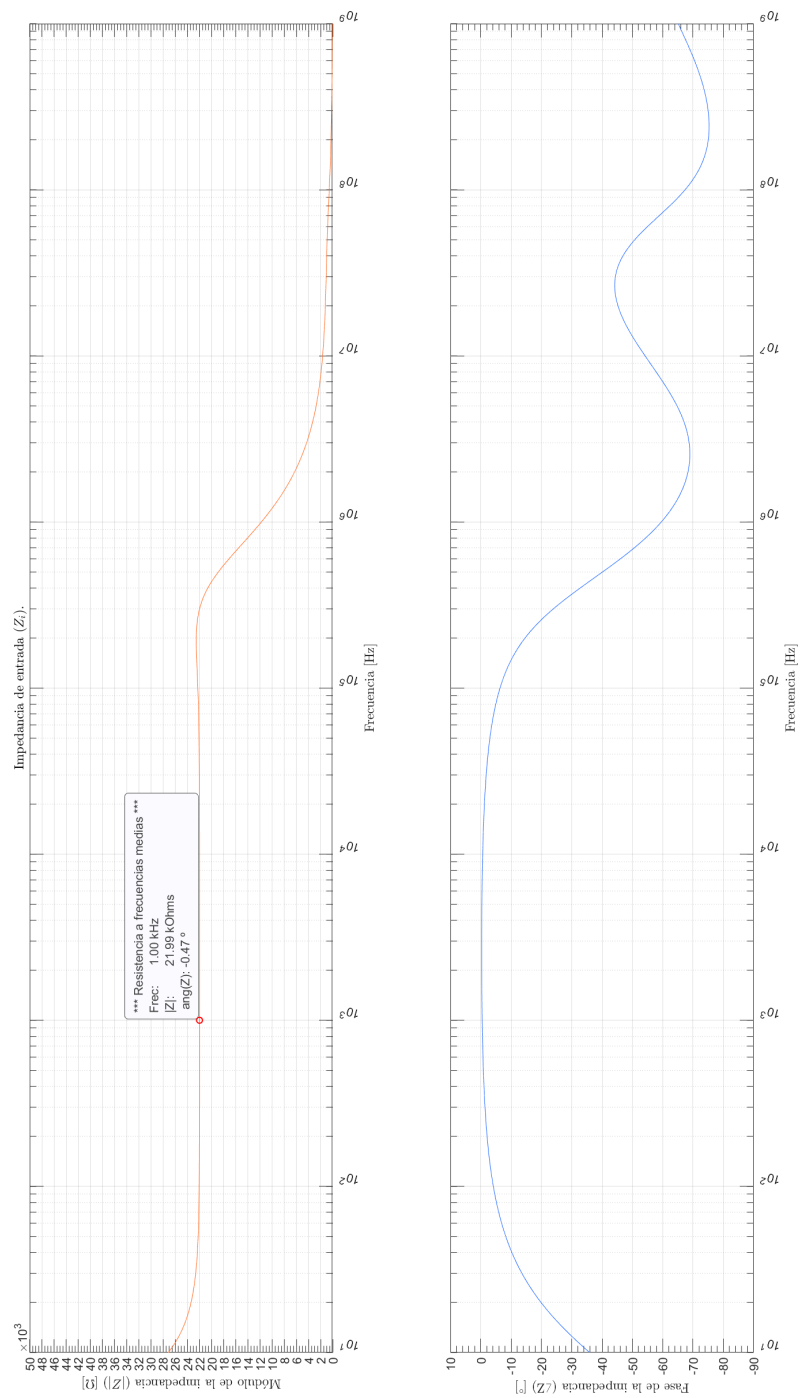


Figura 3.5: Valores de impedancia de entrada (simulación).

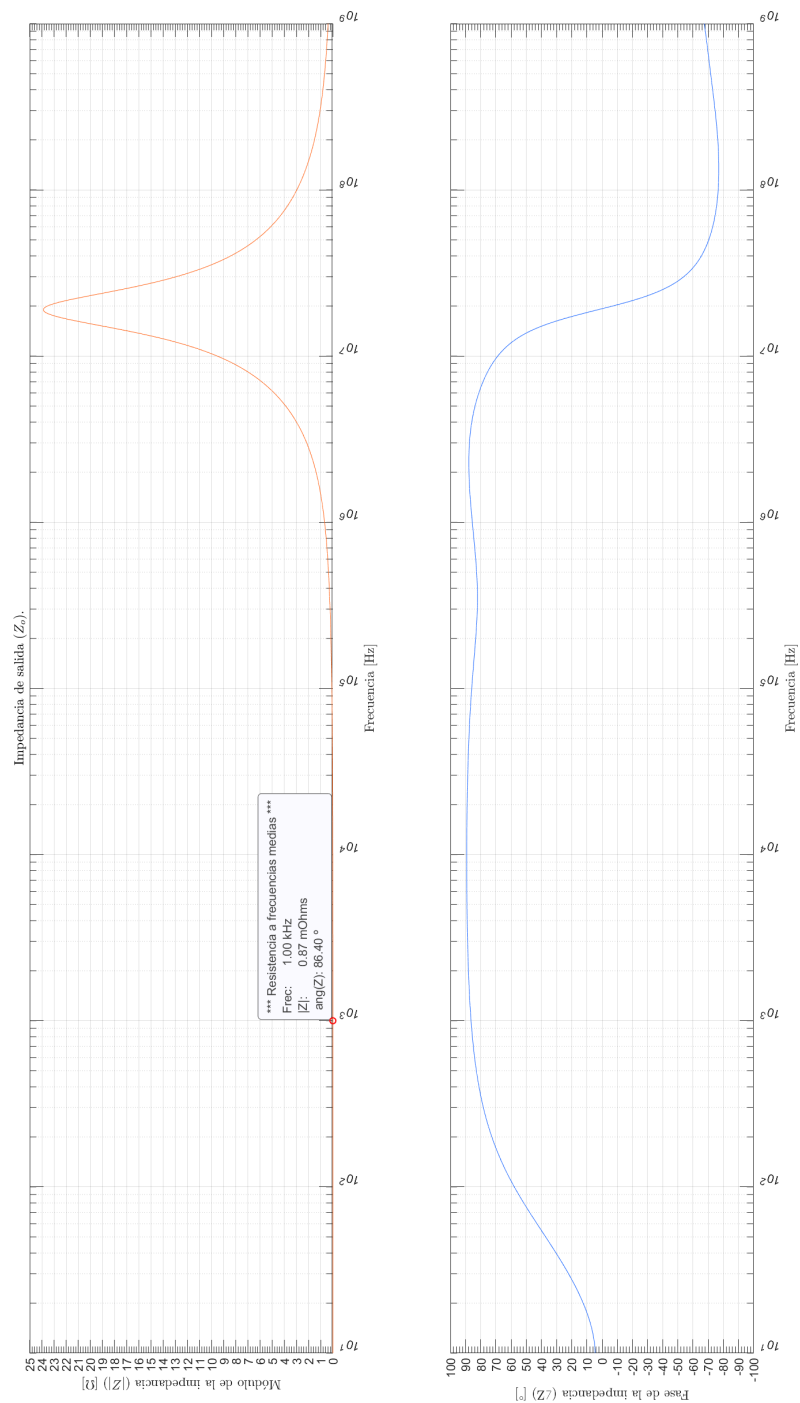


Figura 3.6: Valores de impedancia de salida (simulación).

3.6. THD

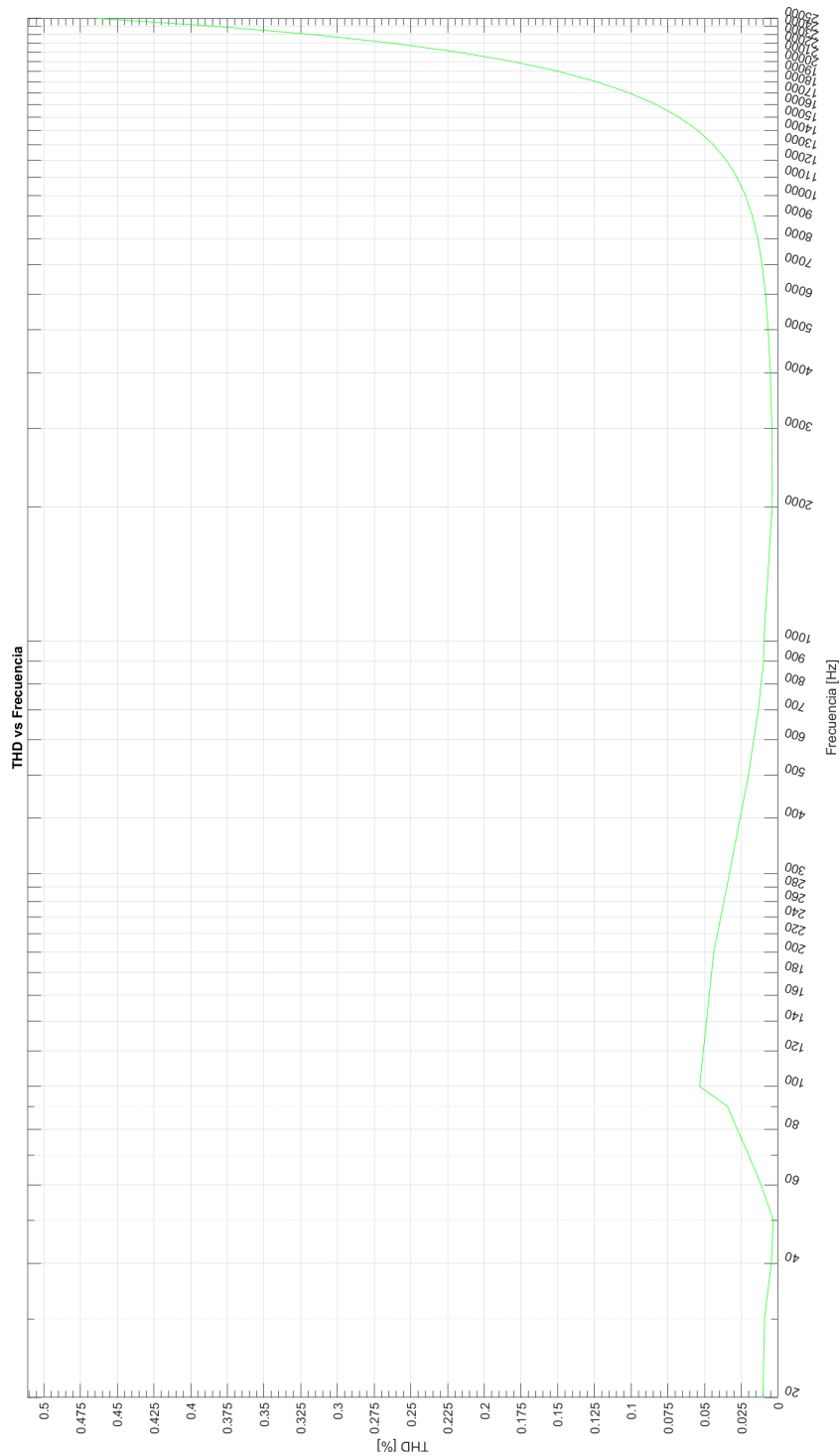


Figura 3.7: THD en función de la frecuencia (simulación).

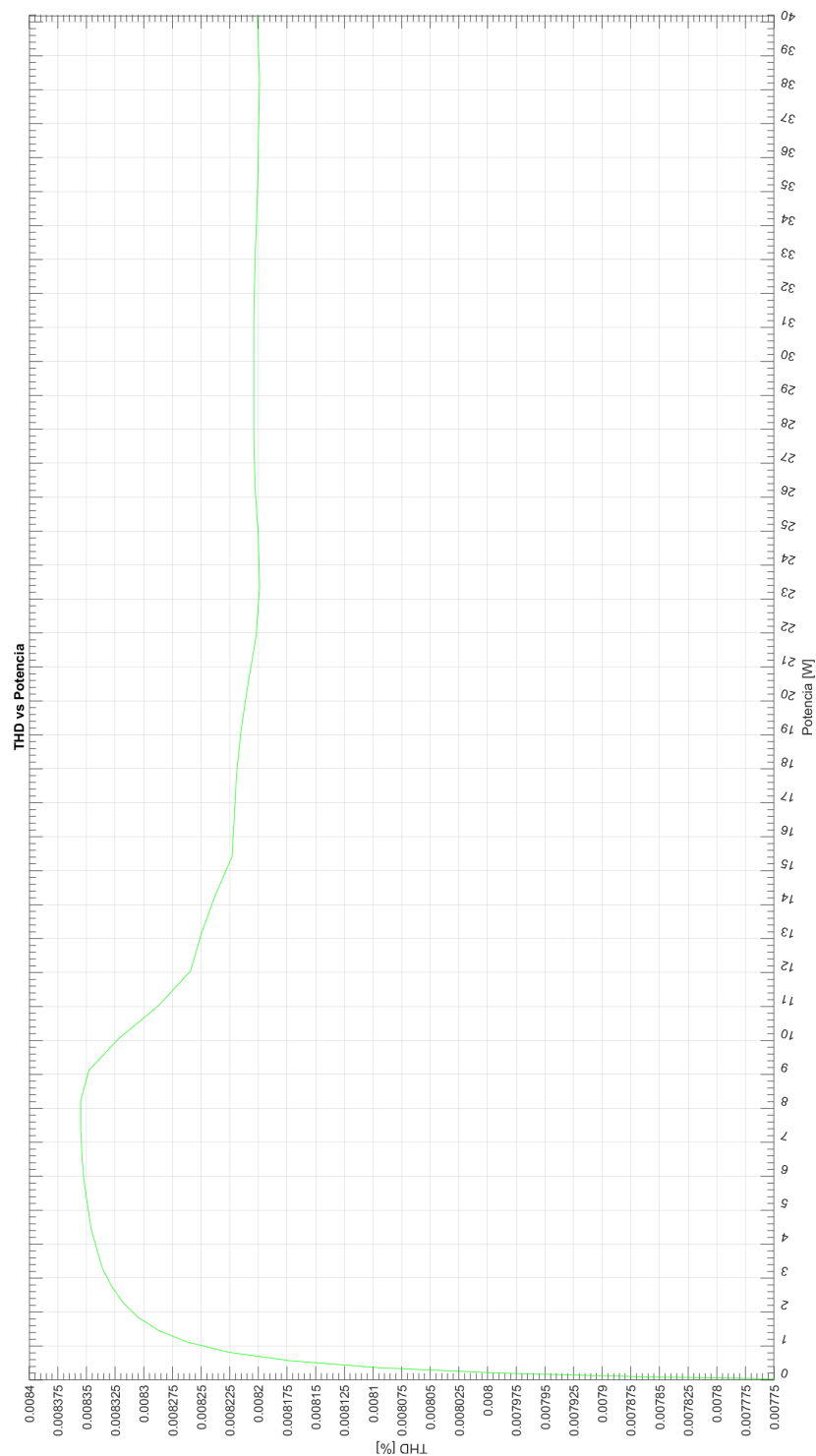


Figura 3.8: THD en función de la potencia (simulación).

3.7. Slew Rate

En la figura [3.9] observamos el resultado de la simulación utilizada para el cálculo del Slew Rate. En la figura [3.10], se aprecia con más claridad la pendiente para el cálculo, además del efecto que produce la conmutación entre las fuentes de 15V y 35V.

A partir del cálculo de la pendiente producida por la respuesta al escalón obtenemos como resultado del Slew Rate:

- Slew Rate = $4,79\text{V}/\mu\text{s}$

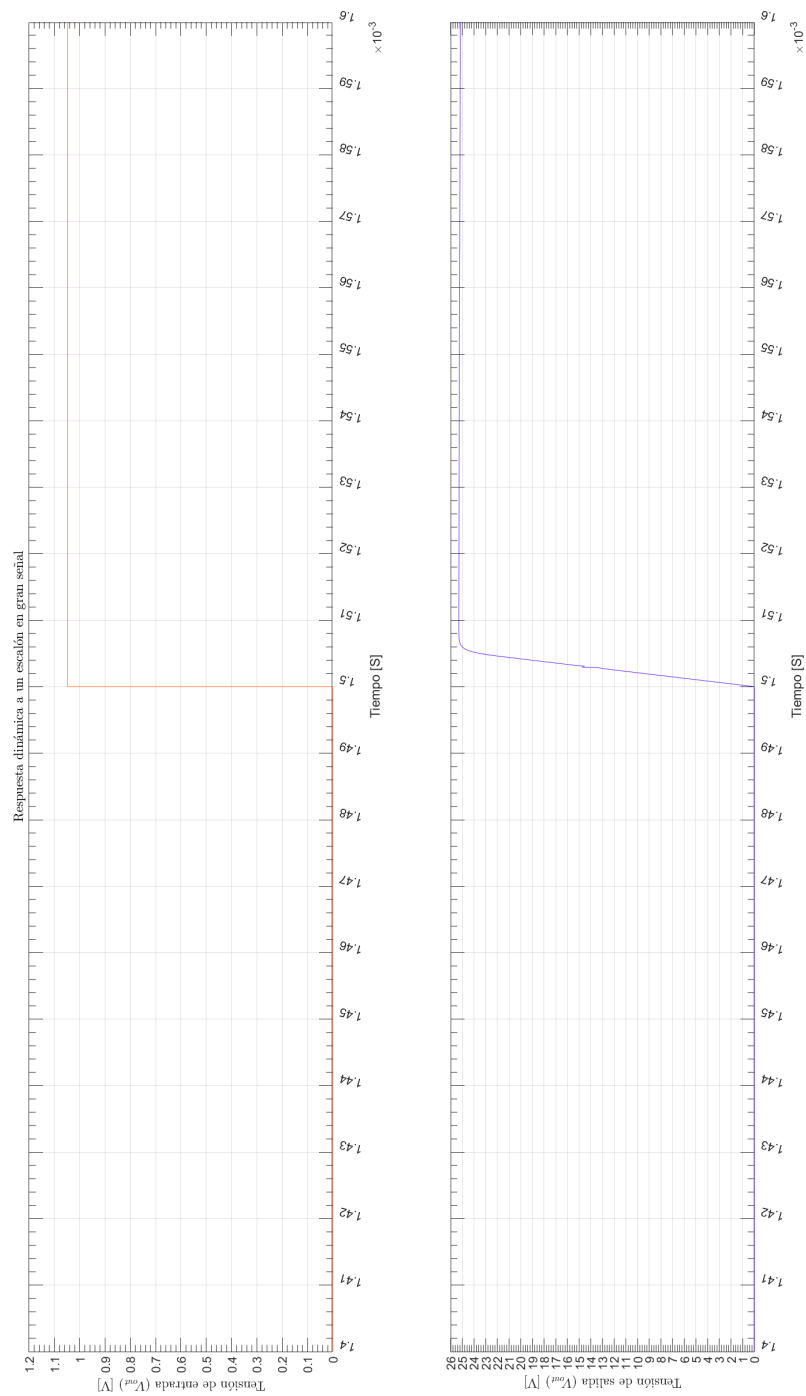


Figura 3.9: Tiempo de crecimiento (simulación).

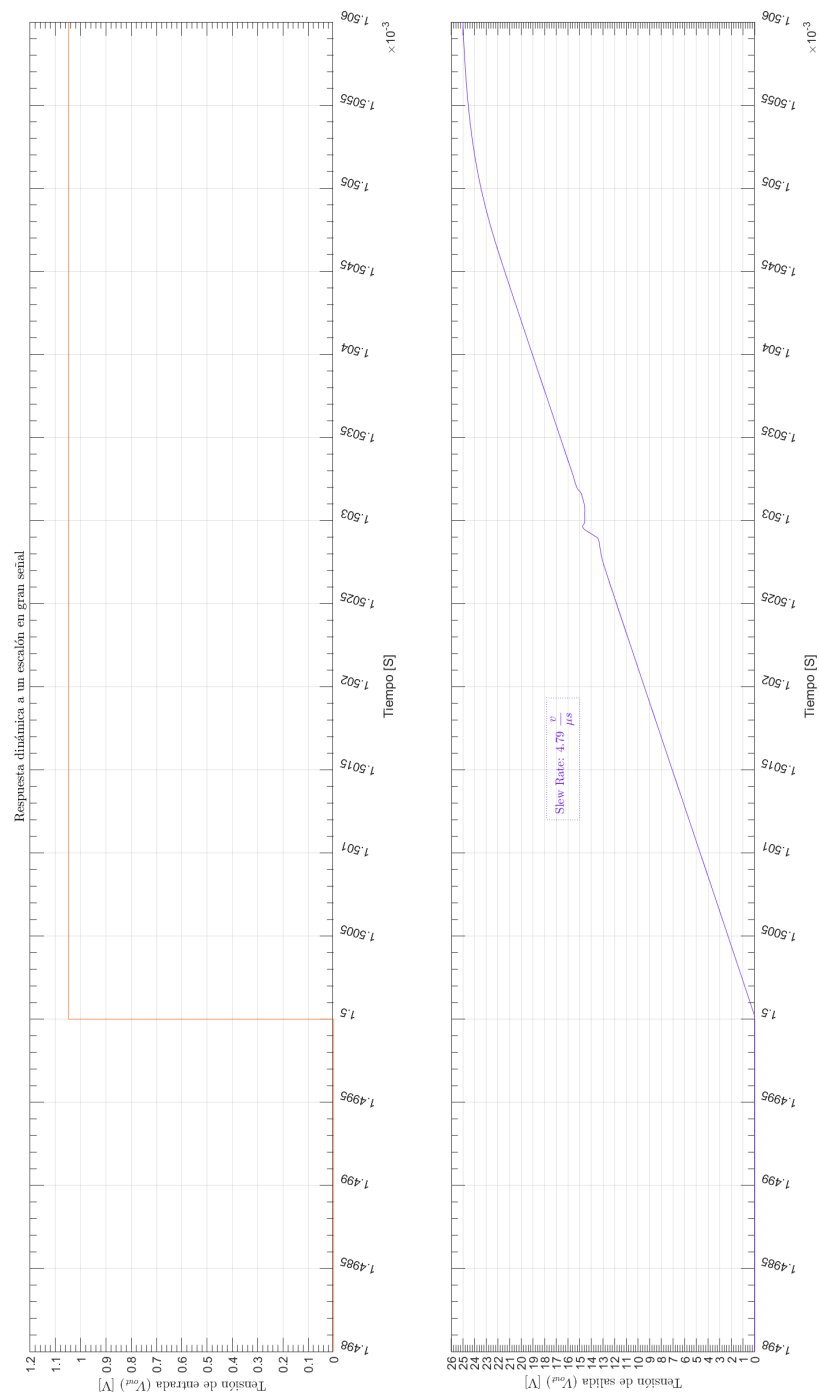


Figura 3.10: Tiempo de crecimiento, zoom sobre la pendiente (simulación).

4. Mediciones

4.1. Polarización

Se realizaron las mediciones de punto de polarización del amplificador sin señal aplicada, obteniéndose los resultados de la tabla [4.1]. Los mismos se verificaron con y sin la carga conectada para observar que no haya cambios en la polarización, una vez ajustada la corriente de polarización de salida.

Transistor	V_{CEQ}	I_{CQ}	P_Q
Q_1 (BC546C)	0V	0mA	0mW
Q_2 (BC556B)	0V	0mA	0mW
Q_3 (BC546B)	0V	0mA	0mW
Q_4 (BC556B)	0V	0mA	0mW
Q_5 (BC546B)	0V	0mA	0mW
Q_6 (BC546B)	0V	0mA	0mW
Q_7 (BC556B)	0V	0mA	0mW
Q_8 (BC556B)	0V	0mA	0mW
Q_9 (BD135)	0V	0mA	0mW
Q_{10} (BD136)	0V	0mA	0mW
Q_{11} (BD136)	0V	0mA	0mW
Q_{12} (BD135)	0V	0mA	0mW
Q_{13} (BD135)	0V	0mA	0mW
Q_{14} (MJL21194)	0V	0mA	0mW
Q_{15} (MJL21194)	0V	0mA	0mW
Q_{16} (MJL21193)	0V	0mA	0mW
Q_{17} (MJL21193)	0V	0mA	0mW
Q_{18} (2N3906)	0V	0mA	0mW
Q_{19} (2N3904)	0V	0mA	0mW

Cuadro 4.1: Primer punto de operación.

Transistor	V_{CEQ}	I_{CQ}	P_Q
Q_1 (BC546C)	0V	0mA	0mW
Q_2 (BC556B)	0V	0mA	0mW
Q_3 (BC546B)	0V	0mA	0mW
Q_4 (BC556B)	0V	0mA	0mW
Q_5 (BC546B)	0V	0mA	0mW
Q_6 (BC546B)	0V	0mA	0mW
Q_7 (BC556B)	0V	0mA	0mW
Q_8 (BC556B)	0V	0mA	0mW
Q_9 (BD135)	0V	0mA	0mW
Q_{10} (BD136)	0V	0mA	0mW
Q_{11} (BD136)	0V	0mA	0mW
Q_{12} (BD135)	0V	0mA	0mW
Q_{13} (BD135)	0V	0mA	0mW
Q_{14} (MJL21194)	0V	0mA	0mW
Q_{15} (MJL21194)	0V	0mA	0mW
Q_{16} (MJL21193)	0V	0mA	0mW
Q_{17} (MJL21193)	0V	0mA	0mW
Q_{18} (2N3906)	0V	0mA	0mW
Q_{19} (2N3904)	0V	0mA	0mW

Cuadro 4.2: Segundo punto de operación.

- 4.2. Ancho de banda
- 4.3. Ancho de banda de potencia
- 4.4. Potencia
- 4.5. Sensibilidad
- 4.6. Slew Rate
- 4.7. THD

5. Observaciones y conclusiones

6. Bibliografía

Referencias

- [1] *Analysis and Design of Analog Integrated Circuits (3rd Edition)*
Author: Paul R. Gray
Author: Robert G. Meyer
Publisher: John Wiley & Sons, Inc.; 3rd Edition (January 15, 1993)
Copyright: © 1993, John Wiley & Sons, Inc.
ISBN 10: 0471574953
Website: [Analysis and Design of Analog Integrated Circuits \(3rd Edition\)](#)
- [2] *Analysis and Design of Analog Integrated Circuits (4th Edition)*
Author: Paul R. Gray
Author: Paul J. Hurst
Author: Stephen H. Lewis
Author: Robert G. Meyer
Publisher: John Wiley & Sons, Inc.; 4th Edition (2001)
Copyright: © 2001, John Wiley & Sons, Inc.
ISBN 10: 0471321680
ISBN 13: 9780471321682
Website: [Analysis and Design of Analog Integrated Circuits \(4th Edition\)](#)
- [3] *Analysis and Design of Analog Integrated Circuits (5th Edition)*
Author: Paul R. Gray
Author: Paul J. Hurst
Author: Stephen H. Lewis
Author: Robert G. Meyer
Publisher: John Wiley & Sons, Inc.; 5th Edition (2009)
Copyright: © 2001, John Wiley & Sons, Inc.
ISBN 10: 0470245999
ISBN 13: 9780470245996
Website: [Analysis and Design of Analog Integrated Circuits \(5th Edition\)](#)

- [4] *Circuitos microelectrónicos (4^{ta} Edición) español*

Author: Adel. S. Sedra

Author: Kenneth C. Smith

Publisher: Oxford, University press; 4^{ta} Edición (2001)

Copyright: © 1999, Oxford, University press México.

Original Copyright: © 1998, 1991, 1987, 1982, Oxford, University press Inc.

ISBN 10: 01951166310

Website: [Circuitos microelectrónicos \(4^{ta} Edición\) español](#)

- [5] *Microelectronic circuits (5th Edition)*

Author: Adel. S. Sedra

Author: Kenneth C. Smith

Publisher: Oxford, University press; 5th Edition (2004)

Copyright: © 2004, 1998, 1991, 1987, 1982, Oxford, University press Inc.

ISBN 10: 0195142527

Website: [Microelectronic circuits \(5th Edition\)](#)

- [6] *AUDIO POWER AMPLIFIER DESIGN HANDBOOK (5th Edition)*

Author: Douglas Self

Publisher: Elsevier Ltd; 5th Edition (2009)

Copyright: © 2009, Douglas Self. Published by Elsevier Ltd. All rights reserved.

ISBN 13: 9780240521626

Website: [AUDIO POWER AMPLIFIER DESIGN HANDBOOK \(5th Edition\)](#)

Apéndices

A. Hojas de datos

A.1. BD135

NPN Plastic Medium-Power Silicon Transistors

Manufacturer page: <https://www.onsemi.com/PowerSolutions/product.do?id=BD135>

Manufacturer Datasheet: <https://www.onsemi.com/pub/Collateral/BD135-D.PDF>

A.2. BD136

PNP Plastic Medium-Power Silicon Transistors

Manufacturer page: <https://www.onsemi.com/PowerSolutions/product.do?id=BD136>

Manufacturer Datasheet: <https://www.onsemi.com/pub/Collateral/BD136G-D.PDF>

A.3. BC556

PNP Silicon Transistor

Manufacturer page: <https://www.onsemi.com/PowerSolutions/product.do?id=BC556>

Manufacturer Datasheet: <https://www.onsemi.com/pub/Collateral/BC556BTA-D.pdf>

A.4. MJL21193

PNP Bipolar Power Transistor

Manufacturer page: <https://www.onsemi.com/PowerSolutions/product.do?id=MJL21193>

Manufacturer Datasheet: <https://www.onsemi.com/pub/Collateral/MJL21193-D.PDF>

A.5. MJL21194

NPN Bipolar Power Transistor

Manufacturer page: <https://www.onsemi.com/PowerSolutions/product.do?id=MJL21194>

Manufacturer Datasheet: <https://www.onsemi.com/pub/Collateral/MJL21193-D.PDF>

A.6. 1N4148

Small signal diode

Manufacturer page: <https://www.onsemi.com/PowerSolutions/product.do?id=1N4148>

Manufacturer Datasheet: <https://www.vishay.com/docs/81857/1n4148.pdf>

A.7. 1N4370

Zener Voltage Regulator Diode

Manufacturer page: <https://www.microsemi.com/existing-parts/parts/121321>

Manufacturer Datasheet: http://pdf.datasheetcatalog.com/datasheet/microsemi/1N746_759A_4370_4372A.pdf

A.8. 1N4007

Silicon rectifier diode

Manufacturer page: <https://www.onsemi.com/products/discretes-drivers/diodes-rectifiers/rectifiers/1n4007>

Manufacturer Datasheet: <http://pdf.datasheetcatalog.com/datasheet/fairchild/1N4007.pdf>

A.9. 1N5822

Schottky Barrier Rectifier

Manufacturer page: <https://www.onsemi.com/products/discretes-drivers/diodes-rectifiers/schottky-diodes-schottky-rectifiers/1n5822>

Manufacturer Datasheet: <https://www.onsemi.com/pub/Collateral/1N5820-D.PDF>

A.10. Metal film resistor

Metal film resistor

Manufacturer page: <https://www.vishay.com/resistors-fixed/metal-film/tab/doclibrary/>

A.11. Carbon film resistor

Carbon film resistor

Manufacturer page: <http://www.vishay.com/resistors-fixed/carbon-film/tab/doclibrary/>

A.12. Ceramic capacitor

Ceramic disk capacitor

Manufacturer page: <https://www.vishay.com/capacitors/ceramic/disc/>

A.13. Electrolytic Aluminum capacitor

Electrolytic aluminum capacitor

Manufacturer page: <https://www.vishay.com/capacitors/aluminum/>