

Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Mestrado Integrado em Engenharia Eletrónica Industrial e Computadores
2019/2020

Circuitos Integrados Analógicos e Digitais

PROJETO, OTIMIZAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE UM AMPPOP

João Miguel Costa Sousa-A82273
Leonardo Rafael Correia e Sá-A81330

Docente:

Luís Miguel Valente Gonçalves

Índice

Introdução	5
Projeto e dimensionamento do AMPOP	6
Fonte de polarização própria	6
Amplificador diferencial.....	13
Cálculo de Offset.....	14
Teste do ganho.....	15
Amplificador AB	15
Offset dos dois andares (Diferencial + AB).....	18
Ganho dos dois andares (Diferencial + AB).....	19
Montagem do circuito com condensador de compensação	20
Máxima/Mínima tensão de saturação	21
Simbologia do Ampop	22
Testes do Ampop	23
Testes de ganho unitário.....	23
Testes de ganhos e estabilidade	26
Testes de excursão de saída.....	29
Testes de excursão de entrada.....	31
Testes de CMRR.....	32
Testes de PSRR.....	35
Testes de Slew-rate	37
Testes de consumo	39
Conclusão	40

Índice de figuras

Figura 1- Current source/sink.....	6
Figura 2- Montagem de fonte de polarização própria.....	7
Figura 3- Circuito Arrancador de corrente.....	7
Figura 5- Teste sem circuito de arranque.	8
Figura 4- Teste com circuito de arranque.	8
Figura 6- L=1um e R=50 Ω	9
Figura 7- L=1um e R=55k Ω	9
Figura 8- L=1um e R=110k Ω	10
Figura 9- L=2um e R=50 Ω	10
Figura 10-L=2um e R=55k Ω	10
Figura 11- L=2um e R=110k Ω	11
Figura 12- L=4um e R=50 Ω	11
Figura 13- L=4um e R=55k Ω	11
Figura 14- L=4um e R=110k Ω	12
Figura 15- Montagem de amplificador diferencial.....	13
Figura 16- Circuito usado para medir o offset.	14
Figura 17- Gráfico obtido na medição do offset.	14
Figura 18- Valores de offset medidos.	14
Figura 19- Gráfico do ganho e fase do amplificador diferencial.	15
Figura 20- Esquema do Amplificador AB.....	15
Figura 21- Gráfico de validação do offset.	18
Figura 22- Diagrama de bode com o ganho e fase do Ampop e Margem de ganho para uma margem de fase de 180°.	19
Figura 23- Diagrama de bode para um condensador de compensação de 1pF e valor de frequência de corte.....	19
Figura 24- Diagrama de bode para um condensador de compensação de 0.2pF e valor de frequência de corte.....	20
Figura 25- Esquema do circuito completo do Ampop.....	20
Figura 26- Gráfico de visualização das tensões de saturação.	22
Figura 27- Símbolo do Ampop dimensionado.....	22
Figura 28- Montagem feita para teste de ganho unitário.	23
Figura 29- Teste para um VDD=1.5V e VSS=-1.5V.	24
Figura 30- Teste para um VDD=2.6V e VSS=-2.6V.	24
Figura 31-Teste para um VDD=2.7V e VSS=-2.7V.	24
Figura 32- Teste para um VDD=3V e VSS=-3V....	25
Figura 33- Teste para um VDD=6V e VSS=-6V....	25
Figura 34- Teste para um VDD=15V e VSS=-15V....	25
Figura 35- Montagem para teste de ganho 100.	26
Figura 36- Diagrama de Bode.....	26
Figura 37- Onda de saída para frequência de 5kHz.	27
Figura 38- Onda de saída para frequência de 1MHz.	27
Figura 39- Onda de saída para frequência de 10MHz.	27
Figura 40- Diagrama de bode e margem de ganho do Ampop.....	28
Figura 41- Diagrama de bode e margem de fase do Ampop.	28
Figura 42- Montagem para teste de excursão de saída sem carga.	29
Figura 43- Onda de excursão de saída sem carga.	29

Figura 44- Resultados excursão de saída sem carga.....	29
Figura 45- Montagem com carga para testes de excursão de saída.....	30
Figura 46- Onda de excursão de saída com carga.....	30
Figura 47- Resultados de excursão de saída com carga.....	30
Figura 48- Montagem para testes de excursão de entrada.....	31
Figura 49- Ondas de testes de excursão de entrada.....	31
Figura 50- Resultados de excursão de entrada.....	32
Figura 51- Montagem para testes de CMRR, Acm.....	32
Figura 52- Diagrama de bode de ganho comum.....	33
Figura 53- Montagem para testes de CMRR, Adif.....	33
Figura 54- Diagrama de bode de ganho Adif.....	34
Figura 55- Montagem para testes de PSRR.....	35
Figura 56- Adição de tensão AC na alimentação.....	35
Figura 57- Diagrama de Bode para teste com adição AC na alimentação positiva.....	36
Figura 58- Adição de tensão AC na alimentação negativa	36
Figura 59- Diagrama de bode para teste com adição AC na alimentação negativa.	37
Figura 60- Montagem para teste de slew-rate.....	37
Figura 61- Ondas do teste, descendente de slew-rate.	38
Figura 62- Resultados de teste ascendente de slew-rate	38
Figura 63- Onda de teste ascendente, slew-rate	38
Figura 64- Resultados de teste de slew-rate, transição ascendente	39

Introdução

O seguinte relatório visa um estudo de um Ampop em concordância com a matéria lecionada ao longo do semestre da unidade curricular de Circuitos Integrados Digitais e Analógicos.

Foi-nos proposto como projeto, o desenho, otimização e caracterização de um amplificador em tecnologia CMOS 0.7.

A otimização do mesmo foi feita tendo como principais objetivos as seguintes características:

- Low-power consumption;
- Ganho elevado;
- Maximização do GBP.

Contudo, pretendia-se também a otimização do máximo de características possíveis, tendo como objetivo final a obtenção do melhor Ampop exequível.

Projeto e dimensionamento do AMPOP

De maneira a iniciar o desenho do nosso amplificador operacional começamos por desenhar uma fonte de corrente, a qual terá como objetivo produzir uma corrente de referência para o resto dos ramos que a espelharão.

Existem algumas maneiras de desenhar uma fonte de corrente, no entanto há uma que se destaca das restantes devido a uma grande vantagem, a de não depender das tensões de alimentação para o seu funcionamento, essa é a fonte de polarização própria.

Fonte de polarização própria

Para o dimensionamento da fonte de polarização própria, é necessário primeiramente saber se queremos desenhar uma fonte que espelhe uma “*current source*” ou uma “*current sink*”.

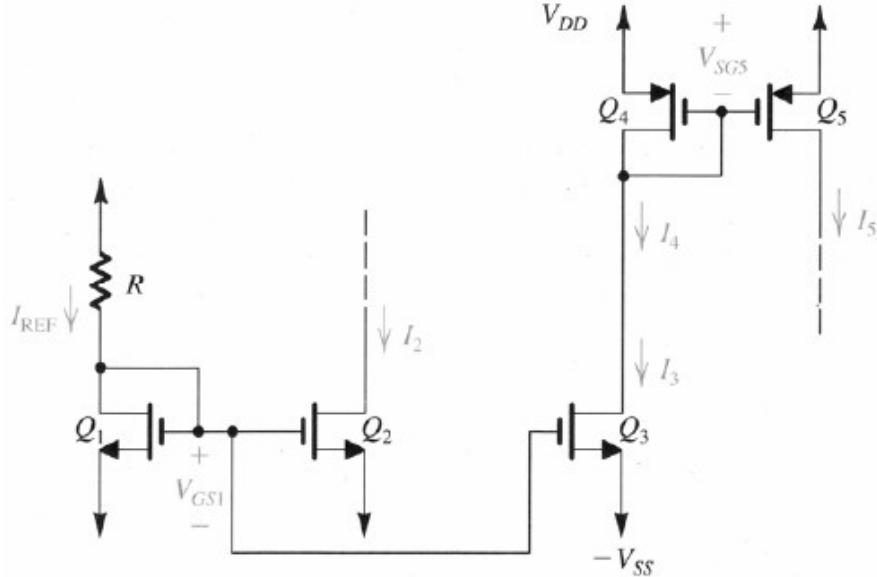


Figura 1- *Current source/sink*.

Na figura anterior, apresenta-se Q5 como exemplo de uma “*current source*” pela sua capacidade de fornecer corrente, e Q2 como exemplo de uma “*current sink*” devido à sua capacidade de fonte absorvedora de corrente.

De acordo com a nossa montagem total do amplificador, foi escolhida uma fonte de polarização própria capaz de espelhar uma fonte do tipo “*current sink*”.

$$IR = V_{GS1} = V_{thn} + \sqrt{\frac{2I}{kn(W1/L1)}}$$

Analizando a equação anterior, é possível observarmos que o dimensionamento de cada componente constituinte, não depende das tensões de alimentação o que representa uma grande vantagem.

Em contrapartida apresenta como desvantagem uma certa sensibilidade com o aumento de temperatura.

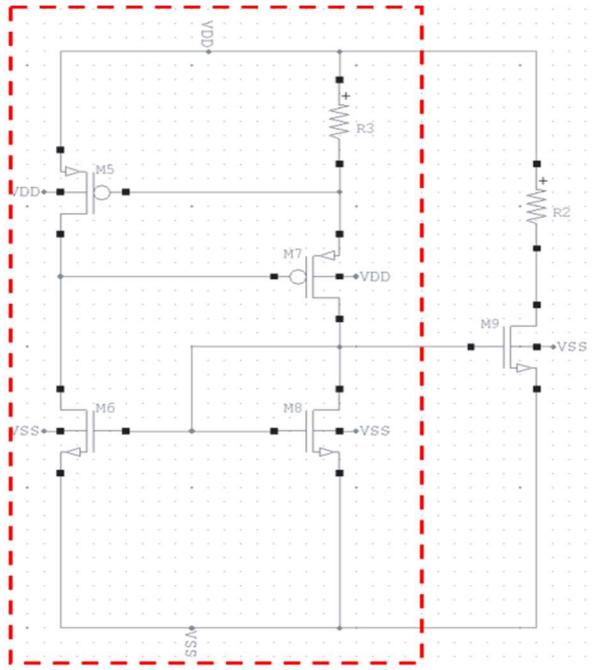


Figura 2- Montagem de fonte de polarização própria.

De acordo com a nossa montagem, os mosfet's tipo N funcionarão como espelhos de corrente. Quanto ao seu dimensionamento, todos terão o mesmo valor de largura de canal (W e L), sendo escolhidos como valores um $W=3\mu m$ e um $L=1\mu m$. **Os valores são baixos de modo a que o consumo do amplificador seja reduzido.**

De modo a assegurar o funcionamento deste circuito teremos também de acrescentar **um circuito arrancador de corrente**, com o seguinte design:

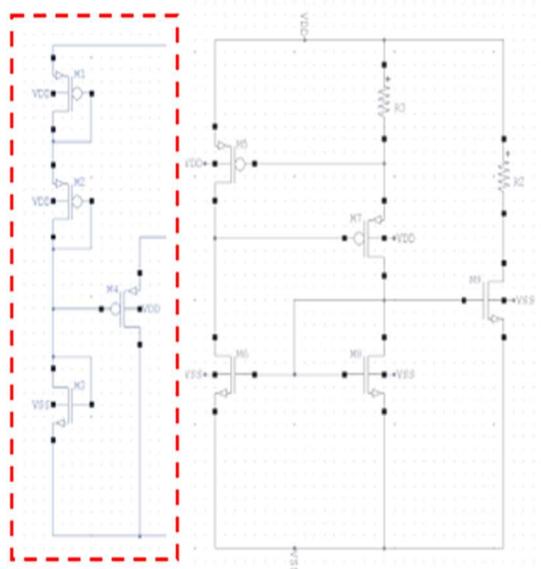


Figura 3- Circuito Arrancador de corrente.

De maneira a revelar a importância do circuito de arranque demonstramos alguns resultados de montagem com circuitos de arranque e sem circuito de arranque.



Figura 5- Teste sem circuito de arranque.

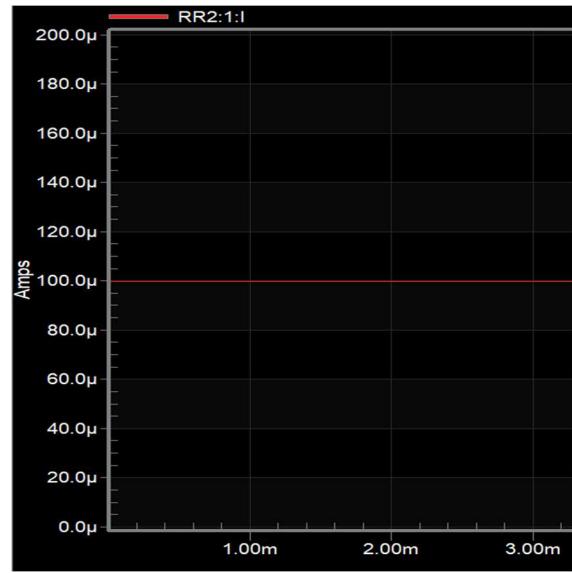


Figura 4- Teste com circuito de arranque.

Como corrente de referência nós optamos por uma corrente relativamente baixa de **100μA**. Posto isto, começamos pelo dimensionamento de R3.

$$IR = V_{tp} + \sqrt{\frac{2I}{K_p(\frac{W^3}{L^3})}}$$

$$100\mu * R3 = 0.98 + \sqrt{\frac{2*100\mu}{23.6\mu*(3)}}\mu$$

$$R3 = 26.6k\Omega$$

De seguida foi calculado o valor máximo de R2 para a corrente de referência. Para isso, realizamos os seguintes cálculos:

$$V_{gs} = \sqrt{\frac{2 * I}{Kn * \frac{W^3}{L^3}}} + V_{thn}$$

$$V_{gs} = \sqrt{\frac{2 * 100\mu}{74\mu * 3}} + 0.75$$

$$V_{gs} = 1.699V$$

$$V_{ds} > V_{gs} - V_{thn} \rightarrow V_{ds} = 0.949V$$

$$V_{r2} = V_{dd} - (V_{ss} + V_{ds})$$

$$V_{r2} = 6V - ((-6V) + (0.949V))$$

$$V_{r2} = 11.051V \rightarrow R2 = 110.51k\Omega$$

$$M1=M2=M3=M4=M5=M6=M7=M8=(3\mu/1\mu)$$

$$R2_{máx}=110k\Omega \quad R3=26.6k\Omega$$

De forma a provar o bom dimensionamento de todos os componentes constituintes da fonte, foram realizados alguns testes para diferentes valores de R₂ com diferentes valores de L.

L	1um	2um	4um
R			
50Ω	121uA	129uA	135uA
55kΩ	118uA	128uA	135uA
110kΩ	103uA	104uA	104uA

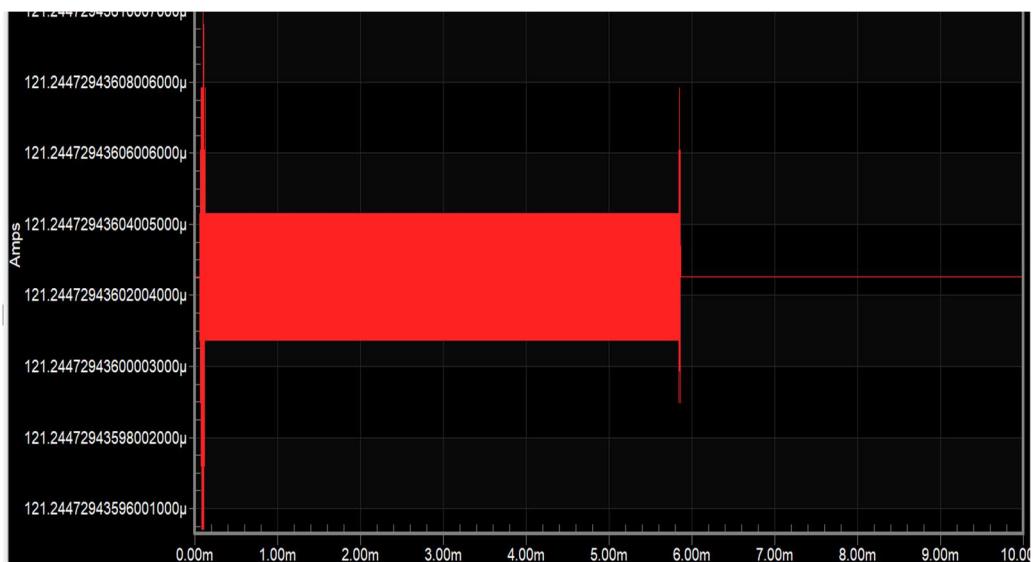


Figura 6- L=1um e R=50Ω.

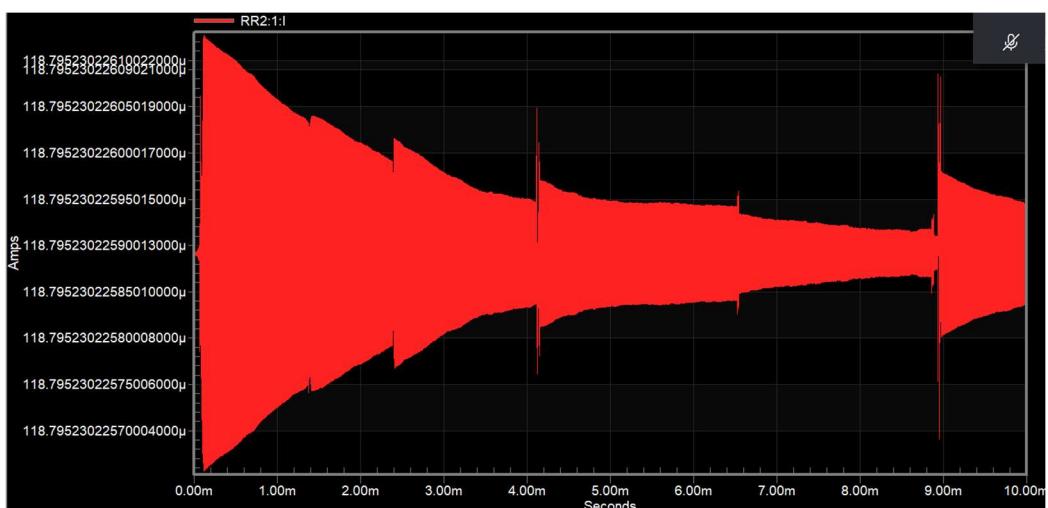


Figura 7- L=1um e R=55kΩ.

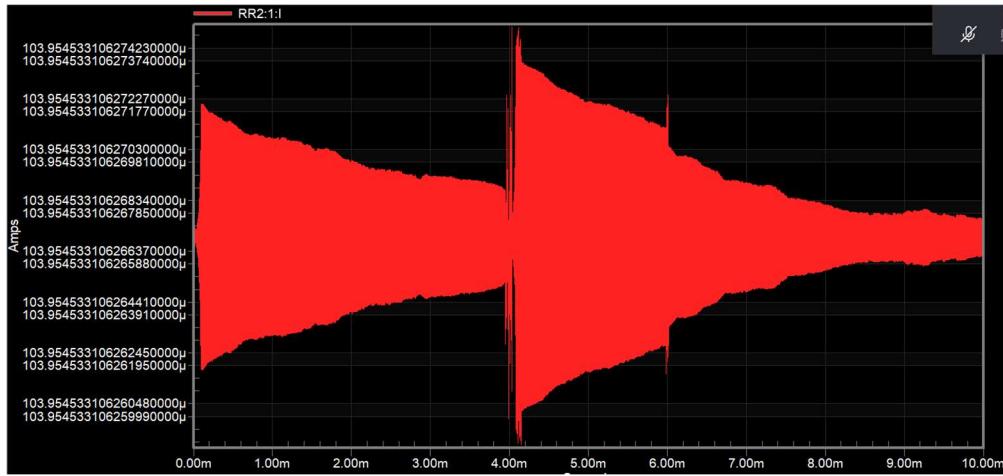


Figura 8- $L=1\mu m$ e $R=110k\Omega$.

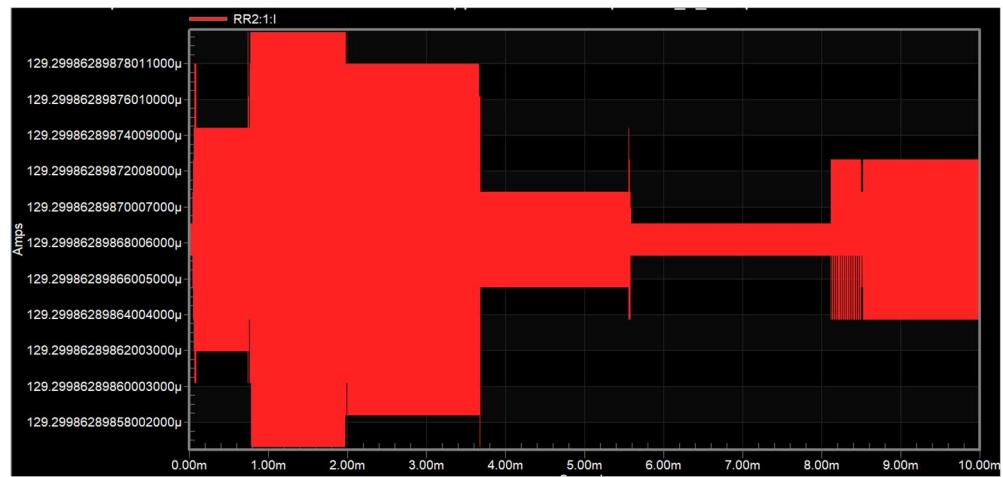


Figura 9- $L=2\mu m$ e $R=50\Omega$.



Figura 10- $L=2\mu m$ e $R=55k\Omega$.

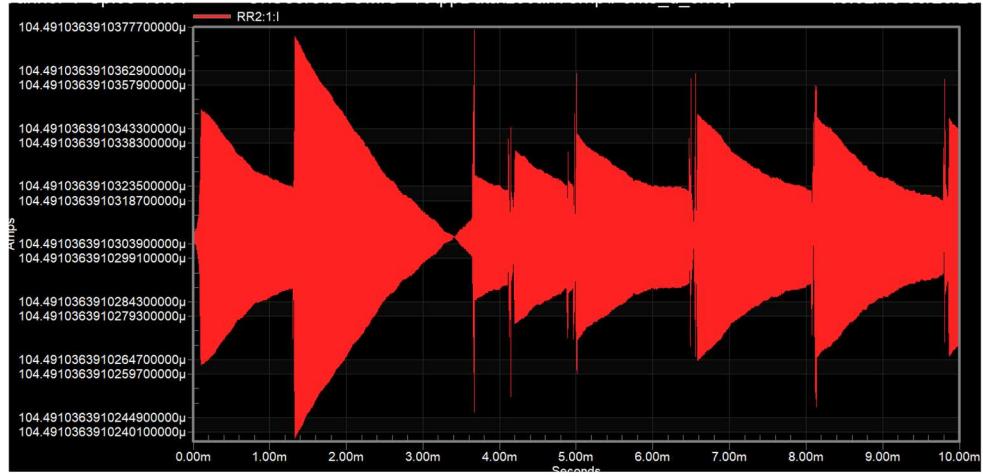


Figura 11- $L=2\mu\text{H}$ e $R=110\text{k}\Omega$.

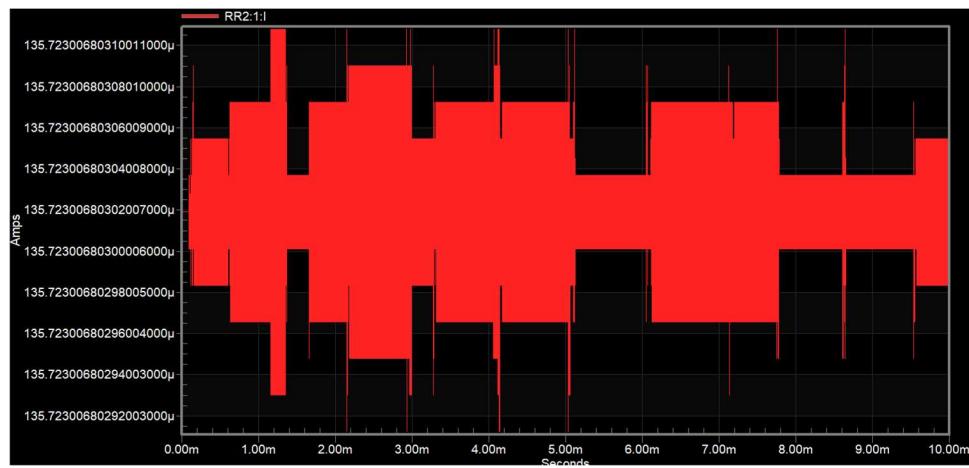


Figura 12- $L=4\mu\text{H}$ e $R=50\Omega$.

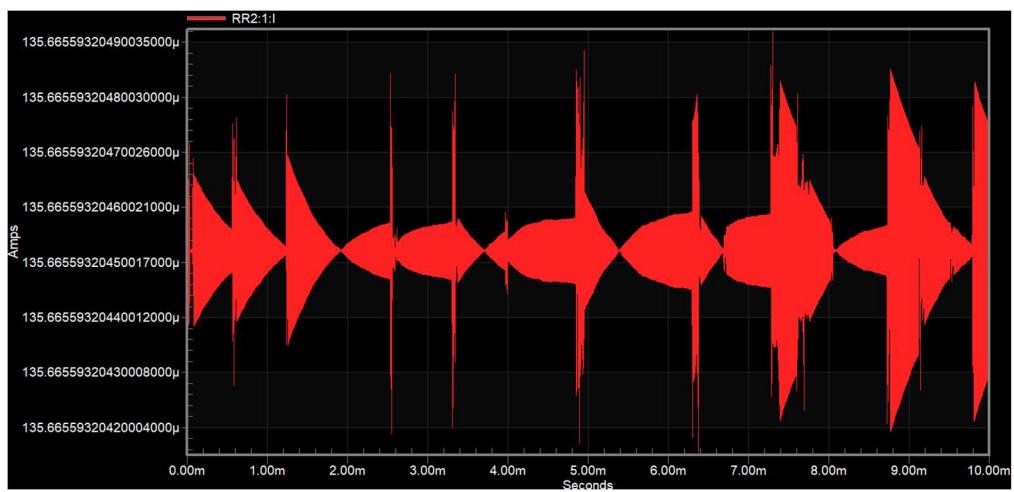


Figura 13- $L=4\mu\text{H}$ e $R=55\text{k}\Omega$.

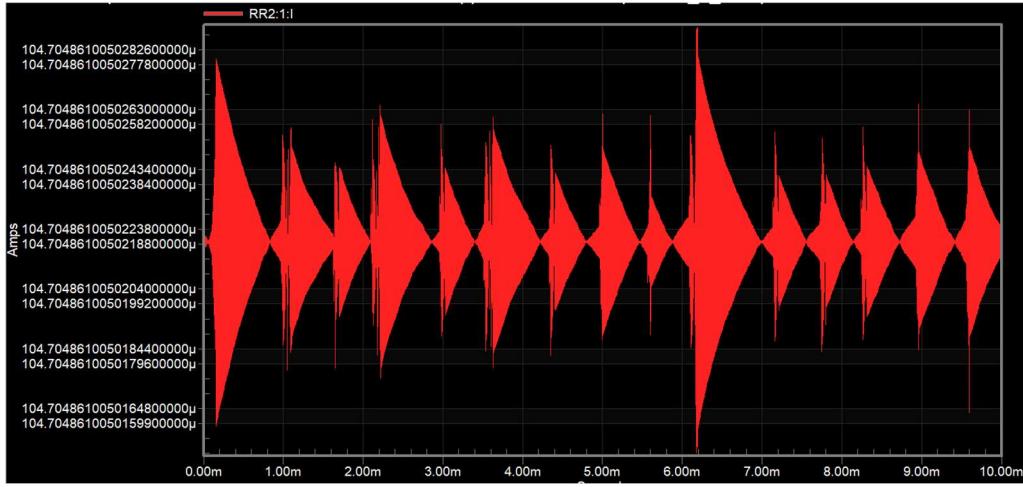


Figura 14- $L=4\mu m$ e $R=110k\Omega$.

No final de todos os testes conclui-se que quanto maior o valor de L para uma resistência baixa menor a estabilidade. E que para um maior valor de L para uma resistência alta, maior a estabilidade, isto é algo que também pode ser provado com a seguinte fórmula de corrente de saturação:

$$I = \frac{1}{2} * Kn * \frac{W}{L} * (Vgs - Vt)^2 * (1 + \lambda Vds)$$

Quanto maior o valor de L menor será o valor de λ , ou seja, mais estável será a corrente, sendo o que se observa nos testes anteriores.

O que também nos permite concluir é que nos locais onde o Vds varia mais é onde é importante ter um L maior de modo a estabilizar a corrente, daí termos escolhido um **L de $2\mu m$ para o M9 ($W=6\mu m$)**.

Amplificador diferencial

Uma vez dimensionada a nossa fonte, passamos para o desenho do primeiro andar do nosso Ampop, o amplificador diferencial, que terá como funcionalidade amplificar a diferença entre as entradas. O desenho deste baseia-se na seguinte montagem.

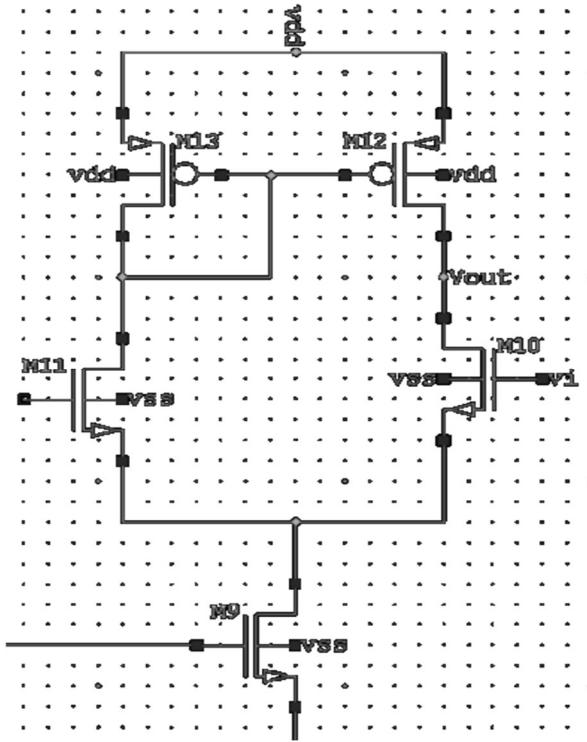


Figura 15- Montagem de amplificador diferencial.

Para este andar do Ampop definiu-se um ganho de **40dB**, ou seja, um ganho de **100**.

Com a fórmula do ganho podemos então obter os valores dos Mosfet's M10 e M11.

$$A = -\sqrt{2 * K_n * \frac{W_4}{L_4} * \frac{1}{\lambda n + \lambda p} * \frac{1}{V_{DD}}}$$

$$100 = -\sqrt{2 * 74\mu * \frac{W_{10}}{L_1} * \frac{1}{0.0012+0.067} * \frac{1}{50\mu}}$$

Obteve-se um **W10** de aproximadamente **16μm**.

No entanto este valor não foi o final, visto que optamos por otimizar o ganho aumentando o L para $2\mu\text{m}$, e deste modo diminuir o valor de λ , **aumentando o valor do ganho**.

M10=M11, W10=32μm L10=2μm M12=M13, W12=16μm e L12=1μm e W9=6μm e L9=2μm.

Cálculo de Offset

De modo a visualizar o offset do andar do diferencial, colocou-se na entrada positiva uma fonte em rampa, de -6V a 6V e a entrada negativa ligada à massa.

O que se fez, foi visualizar a saída e verificar qual será o valor de entrada para que a saída seja nula. Retirando-se assim um valor de offset de 31.8mV.

A montagem utilizada foi a seguinte:

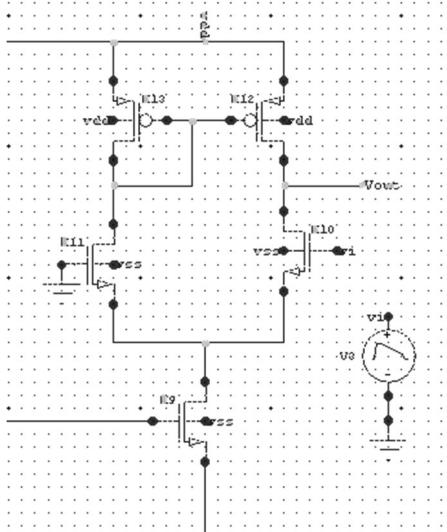


Figura 16- Circuito usado para medir o offset.

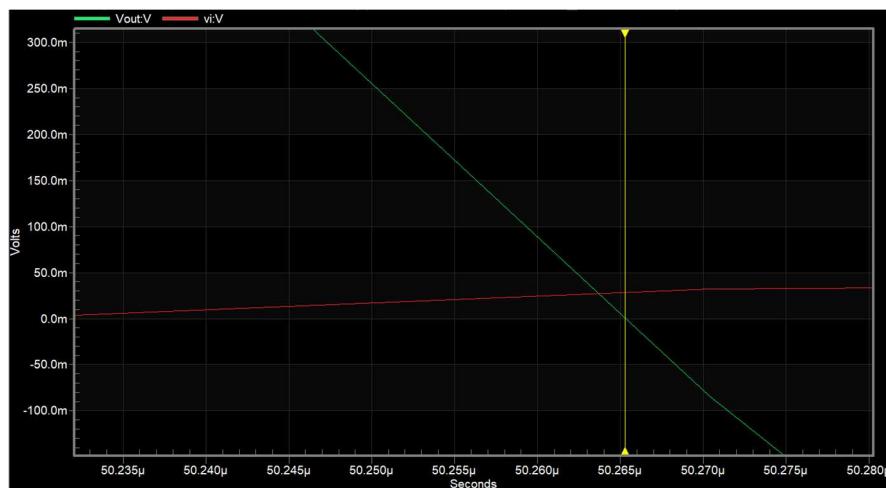


Figura 17- Gráfico obtido na medição do offset.



Figura 18- Valores de offset medidos.

Através do gráfico anterior é possível observar que o valor da rampa de entrada quando a saída é nula é de 31.8mV sendo, portanto, esse o valor de offset.

Teste do ganho

De maneira a verificar o ganho de 100 no circuito diferencial foi retirado o seguinte diagrama de bode, sendo de fácil visualização que o ganho tem efetivamente o valor pretendido, que é 40 em dB.

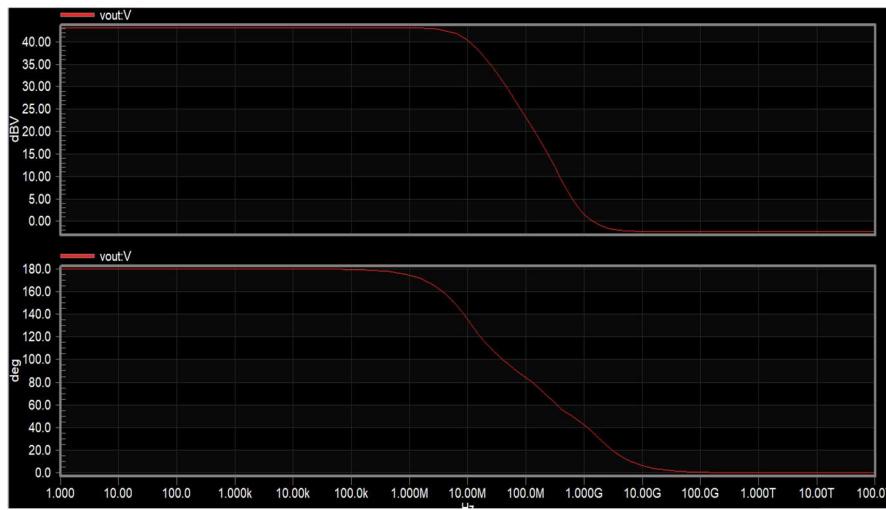


Figura 19- Gráfico do ganho e fase do amplificador diferencial.

Amplificador AB

Nesta fase do relatório abordamos o segundo estágio do Ampop, no qual é desenhado e testado um amplificador AB. A entrada deste é a saída do diferencial.

Para uma determinada carga este circuito consegue juntar as vantagens da montagem do circuito do dreno comum com a montagem de circuitos de source comum. Pois permite tanto um bom fornecimento de corrente, como uma boa absorção de corrente da carga.

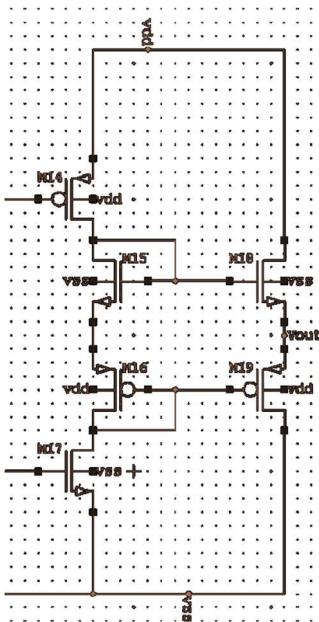


Figura 20- Esquema do Amplificador AB.

Para realizar-se a montagem deste circuito foi definida a corrente no ramo do M14 e M17 como **250µA**.

Para o dimensionamento do mosfet M17 foi usado o espelho de corrente:

$$\frac{\left(\frac{W_6}{L_6}\right)}{\left(\frac{W_{17}}{L_{17}}\right)} = \frac{I_6}{I_{17}}$$

$$\frac{\left(\frac{6}{2}\right)}{\left(\frac{W_{17}}{L_{17}}\right)} = \frac{100\mu}{250\mu}$$

$$W_{17}=8\mu\text{m} \quad L_{17}=1\mu\text{m}$$

Já o dimensionamento do M14 foi feito através de **ganho de 100**:

$$A = -\sqrt{2 * K_p * \frac{W_{14}}{L_{14}} * \frac{1}{\lambda n + \lambda p} * \frac{1}{\sqrt{Id}}}$$

$$100 = -\sqrt{2 * 23.6\mu * \frac{W_{14}}{L_{14}} * \frac{1}{0.0012 + 0.067} * \frac{1}{\sqrt{250\mu}}}$$

$$W_{14} = 246\mu\text{m}, \quad L_{14}=1\mu\text{m}$$

O cálculo de M18 e M19 foi realizado considerando **Imax = 100mA** e Vgs=Vdd.

Visto que Vsource de M18 não está ligada ao potencial mais baixo, existe o fenómeno de efeito de corpo.

$$Vth = Vt0 + \gamma * (\sqrt{2 * \phi f} + Vsb - \sqrt{2\phi f})$$

$$Vth = 0.75 + 0.519 * (\sqrt{2 * 0.116 + 6} - \sqrt{2 * 0.116})$$

$$Vth = 1.795\text{V}$$

$$I = \frac{1}{2} * K_n * \frac{W_{18}}{L_{18}} * (V_{gs} - V_{th})^2$$

$$100m = \frac{1}{2} * 74\mu * \frac{W_{18}}{L_{18}} * (6 - 1.795)^2$$

$$\frac{W_{18}}{L_{18}} = 153$$

$$W_{18} = 153\mu\text{m}, \quad L_{18}=1\mu\text{m}$$

Visto que V_{source} de M19 não está ligada ao potencial mais alto, existe o fenómeno de efeito de corpo.

$$V_{th} = V_{t0} + \gamma * (\sqrt{2 * \phi f + V_{sb}} - \sqrt{2 * \phi f})$$

$$V_{th} = 0.98 + 0.519 * (\sqrt{2 * 0.116 + 6} - \sqrt{2 * 0.116})$$

$$V_{th} = 2.025V$$

$$I = \frac{1}{2} * K_p * \frac{W_{19}}{L_{19}} * (V_{gs} - V_{th})^2$$

$$100m = \frac{1}{2} * 23.6\mu * \frac{W_{19}}{L_{19}} * (6 - 2.025)^2$$

$$\frac{W_{19}}{L_{19}} = 536$$

$$W_{19} = 536\mu m, L_{19} = 1\mu m$$

De maneira a otimizar o circuito, com $\frac{W_{18}}{L_{18}} = 153$:

$$\frac{\left(\frac{W_{19}}{L_{19}}\right)}{\left(\frac{W_{18}}{L_{18}}\right)} = \frac{K_n 18}{K_p 19}$$

$$\frac{\left(\frac{W_{19}}{L_{19}}\right)}{(153)} = \frac{74\mu}{23.6\mu}$$

$$\frac{W_{19}}{L_{19}} = 480$$

$$W_{19} = 480\mu m, L_{19} = 1\mu m$$

A corrente máxima iria ficar limitada por:

$$I = \frac{1}{2} * K_p * \frac{W_{19}}{L_{19}} * (V_{gs} - V_{th})^2$$

$$I = 89mA$$

Considerando o **I_q = 50μA**, ou seja, a corrente quando o mosfet não tem carga igual a 50μA, temos que pelo espelho (I₁₅/I_q):

$$\frac{\left(\frac{W_{15}}{L_{15}}\right)}{\left(\frac{W_{18}}{L_{18}}\right)} = \frac{I_{15}}{I_{18}}$$

$$\frac{\left(\frac{W_{15}}{L_{15}}\right)}{153} = \frac{250\mu}{50\mu}$$

$$\frac{W15}{L15} = 765$$

$$W15 = 765\mu\text{m}, L15=1\mu\text{m}$$

Fazendo da mesma forma para M16 temos:

$$\frac{\left(\frac{W16}{L16}\right)}{\left(\frac{W19}{L19}\right)} = \frac{I16}{I19}$$

$$\frac{\left(\frac{W16}{L16}\right)}{480} = \frac{250\mu}{50u}$$

$$\frac{W16}{L16} = 2400$$

$$W16 = 2400\mu\text{m}, L16=1\mu\text{m}$$

Offset dos dois andares (Diferencial + AB)

Tendo dimensionado os dois andares passamos para a fase de validação e medição das suas características, começando pela medição do offset.

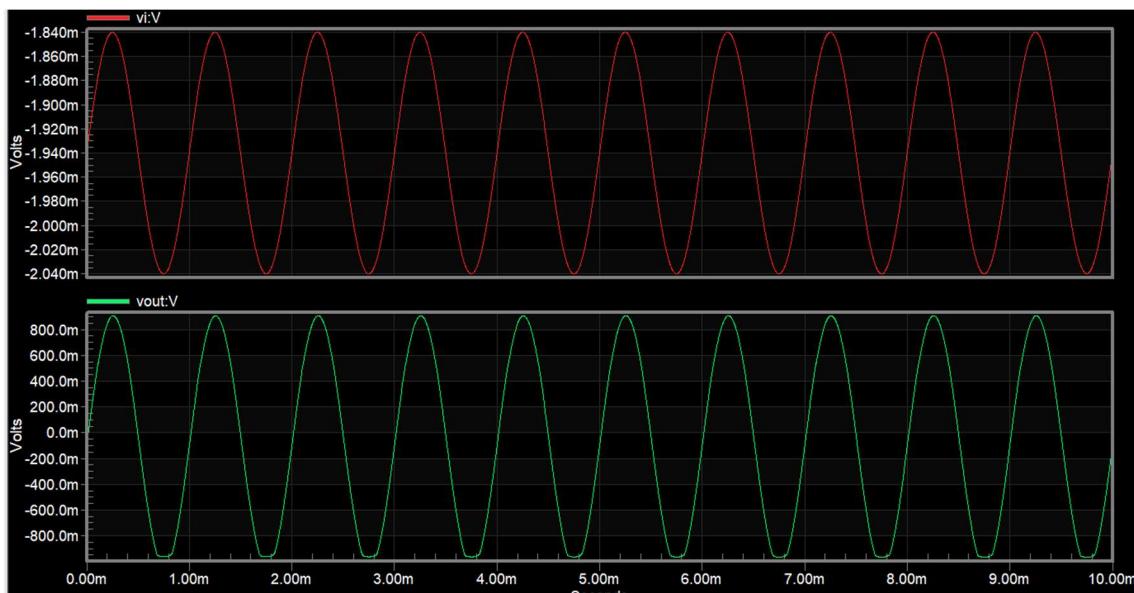


Figura 21- Gráfico de validação do offset.

Realizando os testes necessários, isto é, colocar na entrada uma rampa de -6v a 6v e verificar qual o valor de entrada que faz com que a saída tenha um valor nulo, verifica-se que o valor de offset é de -1.94mV. Esse valor foi validado colocando-o como valor de offset numa fonte sinusoidal com 0.1V de amplitude , sendo obtida à saída uma onda sinusoidal centrada em 0, como podemos constatar no gráfico acima.

Ganho dos dois andares (Diferencial + AB)

O ganho do circuito total foi obtido usando o mesmo método com que se obteve ganho do circuito diferencial, ou seja, com o método da resposta em frequência. Deste diagrama para além do ganho é nos possível avaliar também a estabilidade do circuito com dois andares.

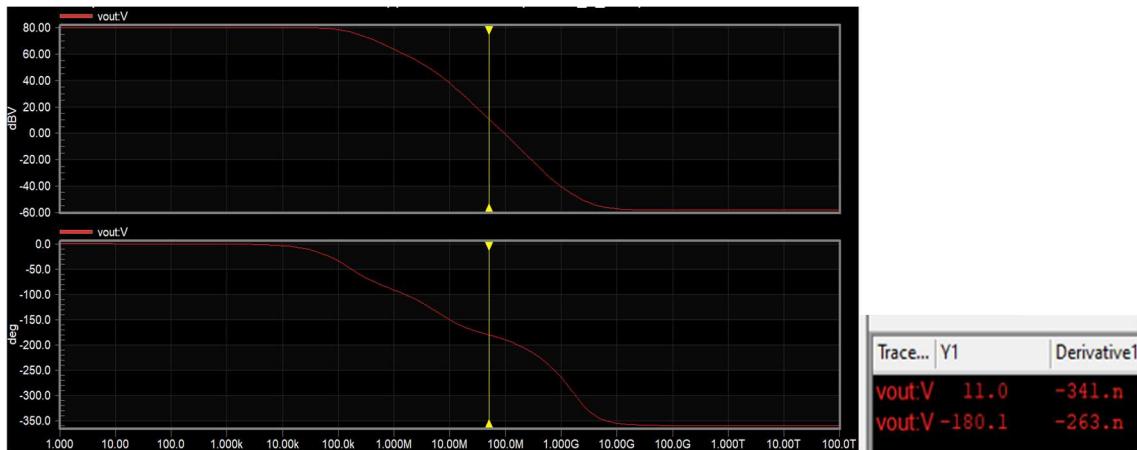


Figura 22- Diagrama de bode com o ganho e fase do Ampop e Margem de ganho para uma margem de fase de 180°.

Como podemos observar, este circuito apresenta-se como um circuito instável visto que para 180°, apresenta uma margem de ganho de 11dB.

De maneira a o tornar estável foi acrescentado um polo no sistema recorrendo a um condensador de compensação.

Como este poderá ter um valor máximo de 1pF para que possa ser implementado dentro do Ampop e de forma a garantir a estabilidade e aproveitamento **máximo de frequência**, foi encontrado de forma empírica um valor de 0.2pF. Sendo desta forma possível ser implementados internamente no Ampop e tornar o circuito estável.

- Teste para um valor de 1pF:

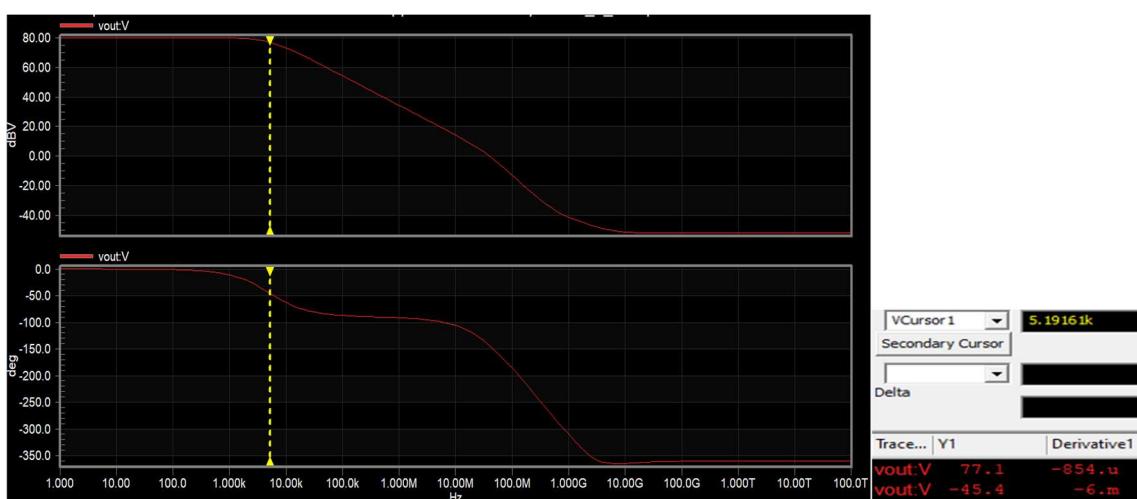


Figura 23- Diagrama de bode para um condensador de compensação de 1pF e valor de frequência de corte.

- Teste para um valor de 0.2pF :

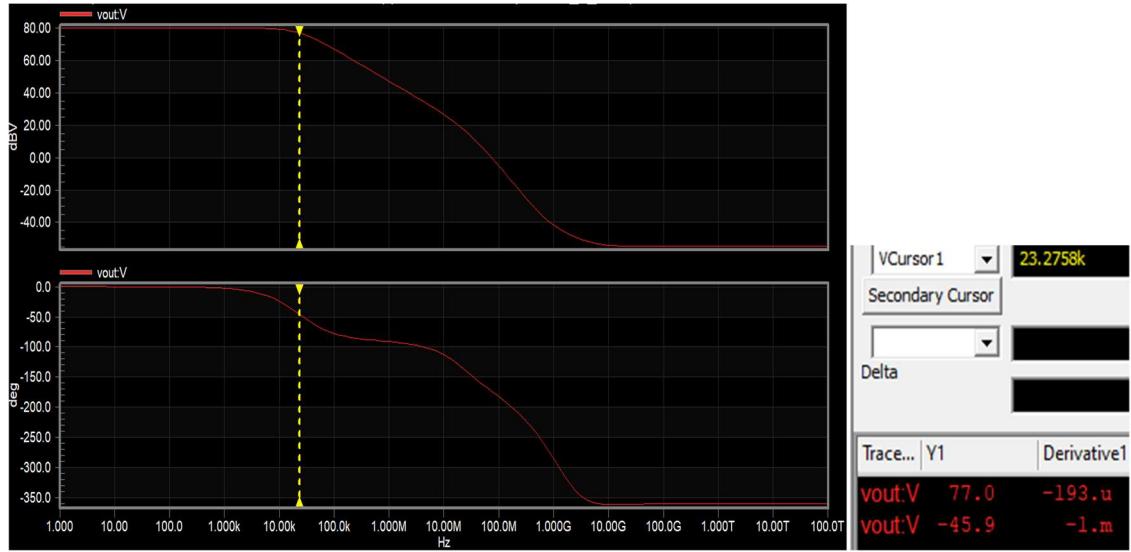


Figura 24- Diagrama de bode para um condensador de compensação de 0.2pF e valor de frequência de corte.

Observando o gráfico verifica-se efetivamente que com um condensador de 0.2pF aproveita-se uma gama maior de frequência, isso consegue-se observar de acordo com a frequência de corte dos dois diagramas de Bode, ou seja, quando temos 45° na fase.

Montagem do circuito com condensador de compensação

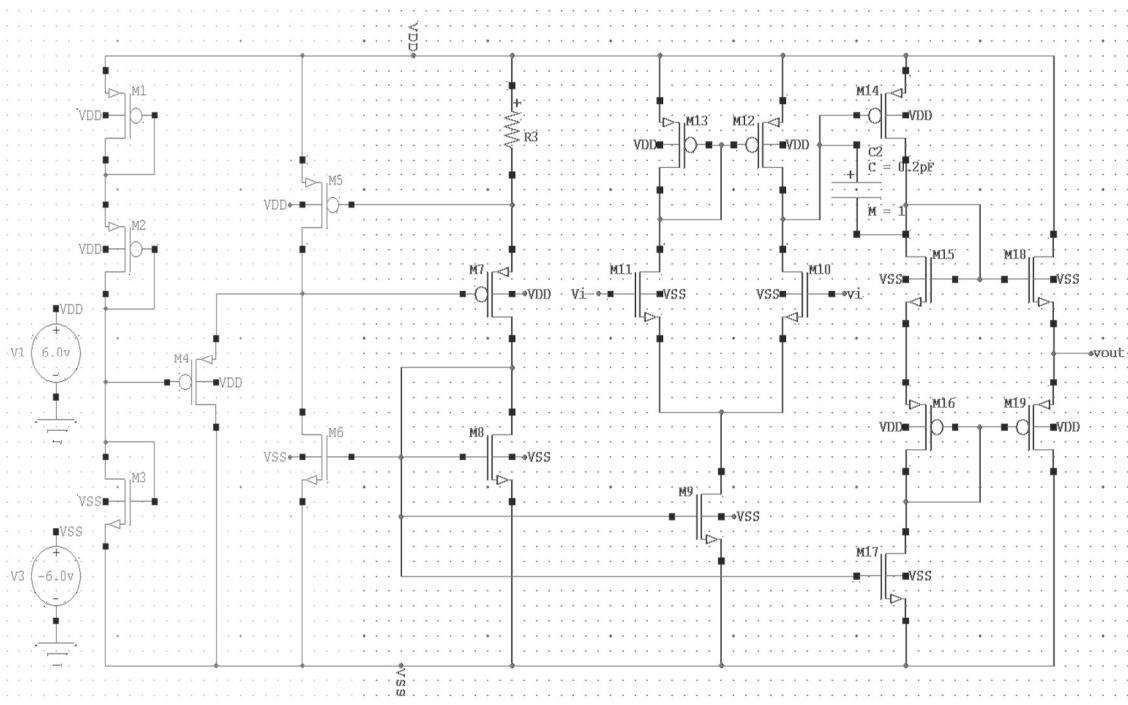


Figura 25- Esquema do circuito completo do Ampop.

Máxima/Mínima tensão de saturação

Para o cálculo teórico **de máxima tensão de saturação** fez-se:

Quando $V_{g18}=6V$

$$1: V_{gs18}=V_g-V_s=6-V_o;$$

$$2: V_o=6-V_{gs18};$$

$$3: I_{18} = \frac{1}{2} * K_n * \frac{W_{18}}{L_{18}} * (V_{gs18} - V_{t18})^2$$

$$3a: 50uA = \frac{1}{2} * 74u * \frac{153}{1} * (V_{gs18} - V_{t18})^2$$

$$4: V_{th18} = V_{t0} + \gamma * (\sqrt{2 * \phi f + V_{sb}} - \sqrt{2\phi f})$$

$$5: V_{th18} = 0.75 + 0.519 * (\sqrt{2 * 0.116 + (V_o - (-6))} - \sqrt{2 * 0.116})$$

6: Com **$V_o=3.8V$** temos $V_{th18}=2.14V$

$$7: 50uA = \frac{1}{2} * 74u * \frac{153}{1} * (V_{gs18} - 2.14)^2$$

$$8: V_{gs18}=2.23V$$

$$9: V_o=6-2.23=3.76V$$

Para o cálculo teórico de **mínima tensão de saturação**:

Quando $V_{g19}=-6V$

$$1: V_{gs19}=V_g-V_s=v_{ss}-V_o;$$

$$2: V_o=-6-V_{gs19};$$

$$3: I_{18} = \frac{1}{2} * K_n * \frac{W_{19}}{L_{19}} * (V_{gs19} - V_{t19})^2$$

$$3a: 50uA = \frac{1}{2} * 23.6u * \frac{480}{1} * (V_{sg19} - V_{t19})^2$$

$$4: V_{th19} = V_{t0} + \gamma * (\sqrt{2 * \phi f + V_{bs}} - \sqrt{2\phi f})$$

$$5: V_{th19} = 0.98 + 0.519 * (\sqrt{2 * 0.116 + (6 - V_o)} - \sqrt{2 * 0.116})$$

6:Com $V_o=-4.4V$ temos $V_{th19}=1.43V$

$$7: 50uA = \frac{1}{2} * 23.6u * \frac{480}{1} * (V_{SG19} - 1.43)^2$$

$$8: V_{gs18}=1.526V \quad \mathbf{V_o=-4.4V}$$

Já em ambiente de simulação, obteve-se:



Figura 26- Gráfico de visualização das tensões de saturação.

Foi introduzida numa das entradas a massa e noutra entrada uma fonte em rampa de -6V a 6V, de modo a verificar-se quais os limites máximo e mínimo da tensão de saturação.

Simbologia do Ampop

Nesta etapa do relatório, damos o Ampop como dimensionado e projetado. Posto isto, resta-nos criar o seu símbolo de modo a que qualquer utilizador quando em contacto com o mesmo, o consiga interpretar e saber como o usar sem saber a sua constituição, ou até mesmo de procurar as suas entradas ou saídas pelo resto do circuito.

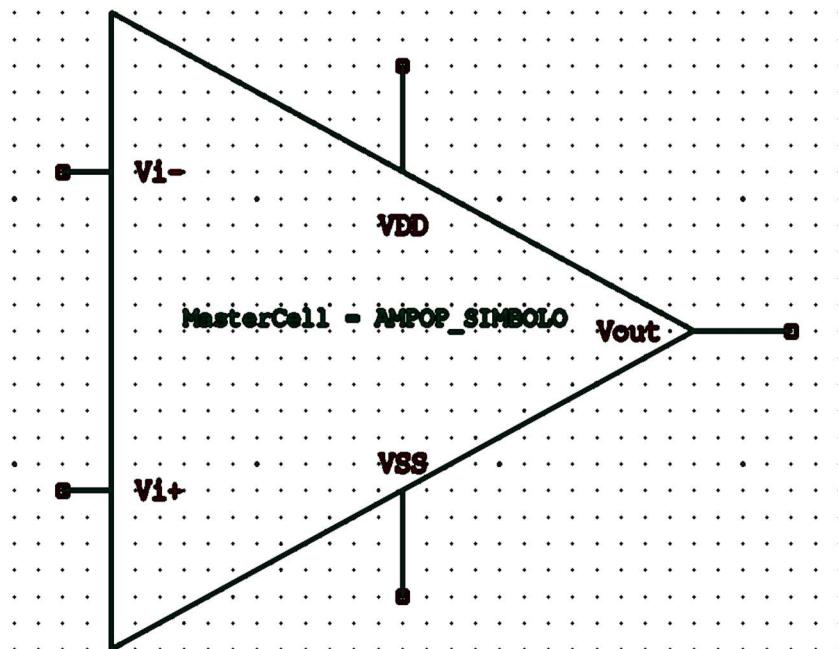


Figura 27- Símbolo do Ampop dimensionado.

Testes do Ampop

Nesta etapa do projeto pretendemos realizar alguns testes de forma a provar a veracidade do que foi referido anteriormente. Os testes também serão realizados com o objetivo de retirar e analisar as características com mais detalhe.

Os testes realizados:

- Testes de ganho unitário;
- Testes de ganho e estabilidade;
- Testes de excursão de saída;
- Testes de excursão de entrada;
- Testes de CMRR;
- Testes de PSRR;
- Teste de slew-rate;
- Teste de consumo.

Testes de ganho unitário

De modo a testar o comportamento do circuito de ganho unitário, também nomeado como seguidor de tensão foi feita a seguinte montagem:

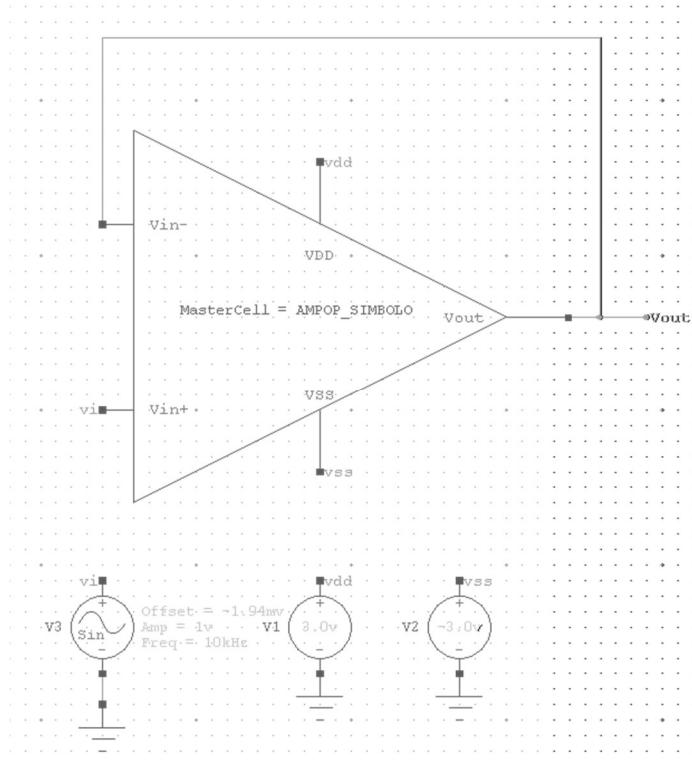


Figura 28- Montagem feita para teste de ganho unitário.

Como entrada foi inserida uma onda sinusoidal com 1V de amplitude a uma frequência de 10kHz, variando os valores de vdd e vss até encontrar os valores mínimos para a tensão de alimentação.

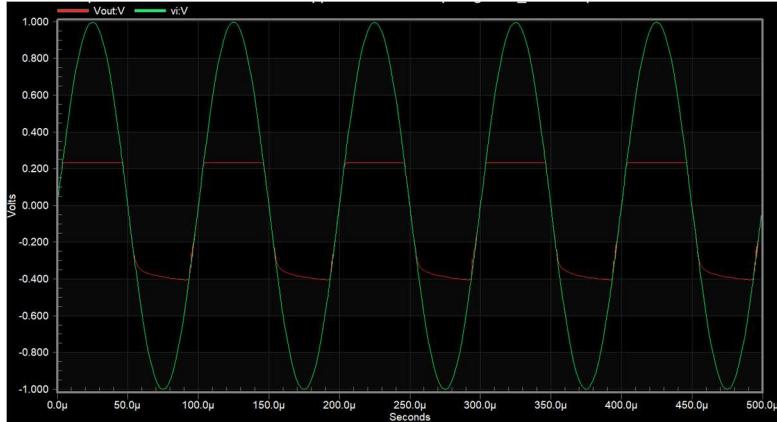


Figura 29- Teste para um VDD=1.5V e VSS=-1.5V.

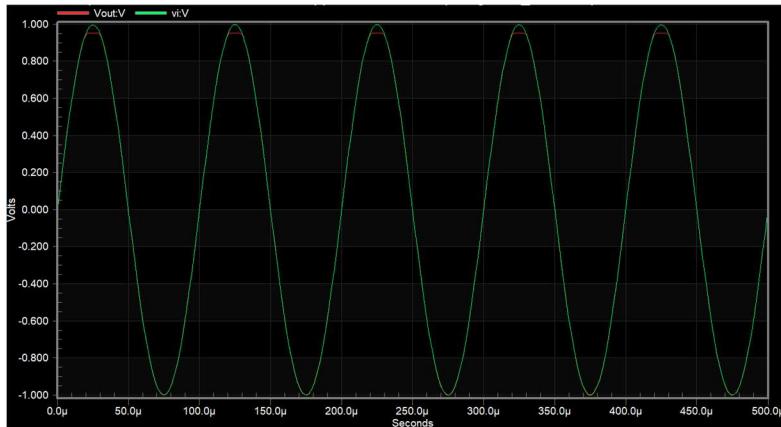


Figura 30- Teste para um VDD=2.6V e VSS=-2.6V.



Figura 31-Teste para um VDD=2.7V e VSS=-2.7V.

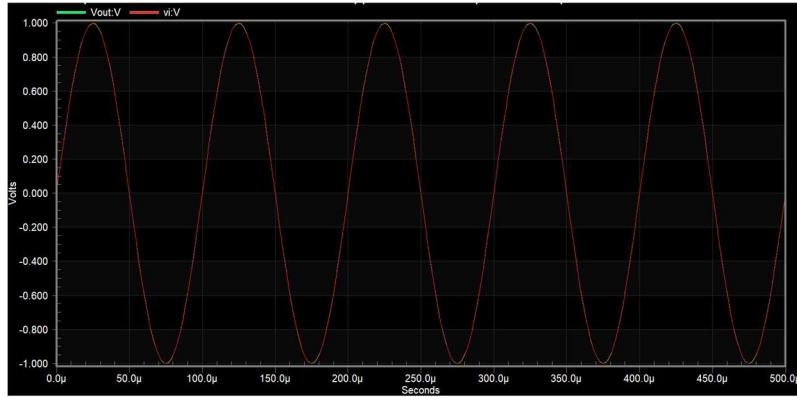


Figura 32- Teste para um $VDD=3V$ e $VSS=-3V$.

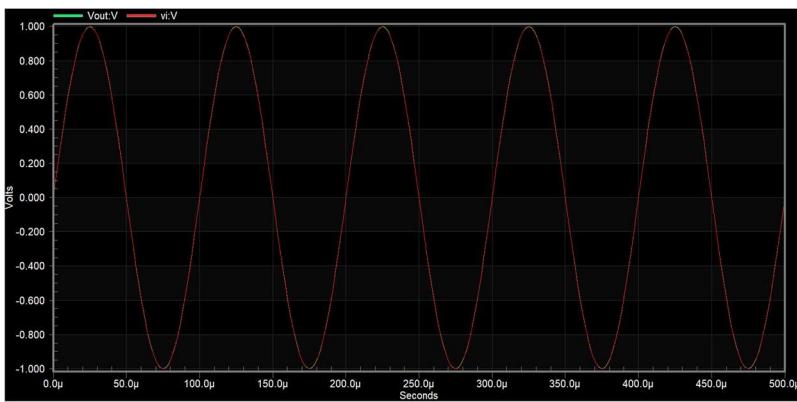


Figura 33- Teste para um $VDD=6V$ e $VSS=-6V$.

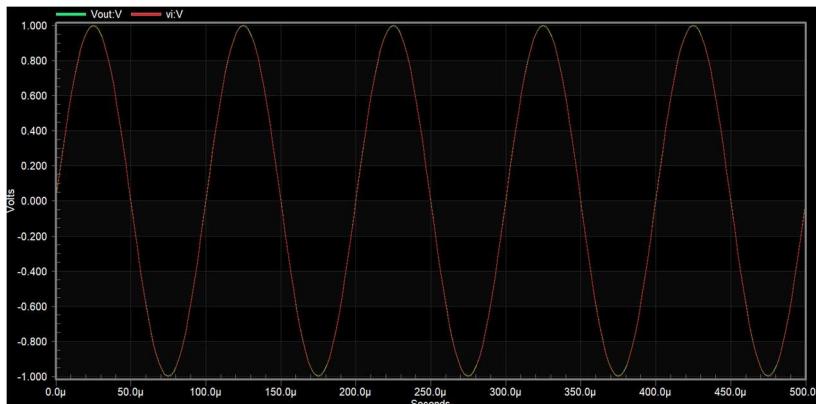


Figura 34- Teste para um $VDD=15V$ e $VSS=-15V$.

É de possível observação que quando na entrada temos uma determinada onda na saída temos essa mesma onda, o que valida o funcionamento do circuito seguidor de tensão.

Fazendo uma análise dos gráficos obtidos conclui-se que para um correto funcionamento do Ampop temos de ter como valores mínimos de tensão de alimentação um $VDD= 2.7V$ e $VSS=-2.7V$. Sendo possível também concluir que para a gama de valores entre $+3V/-3V$ e $+15V/-15V$ o Ampop apresenta um bom funcionamento.

Testes de ganhos e estabilidade

Com os seguintes testes de ganho pretende-se verificar a resposta em frequência do amplificador operacional.

Para uma montagem de ganho=100, tem-se:

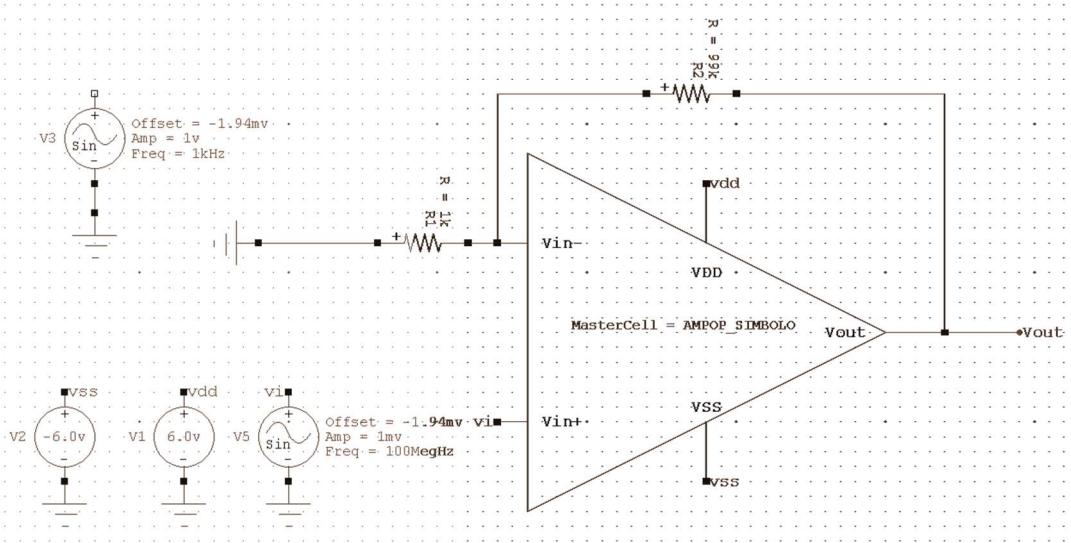


Figura 35- Montagem para teste de ganho 100.

De acordo com o nosso diagrama de Bode, para um ganho de 100, ou seja, de 40dB temos como frequência máxima 2MHz.

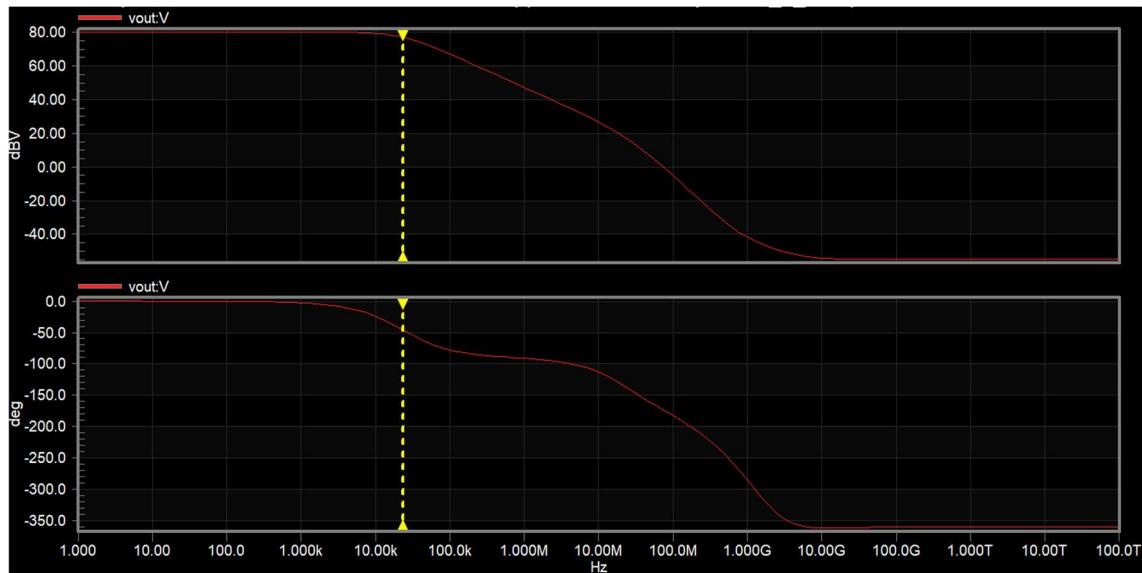


Figura 36- Diagrama de bode.

Variando então a frequência de entrada consegue-se observar:

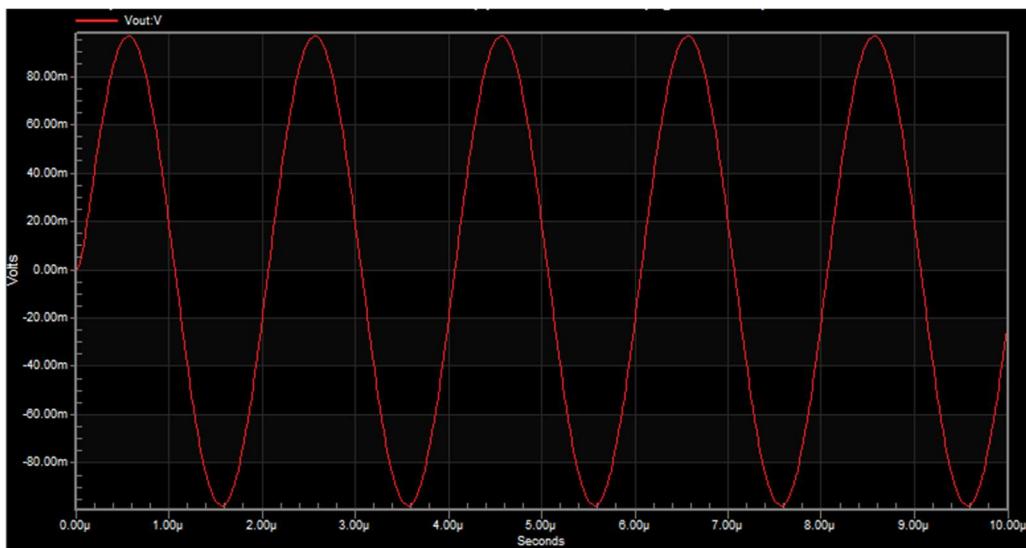


Figura 37- Onda de saída para frequência de 5kHz.

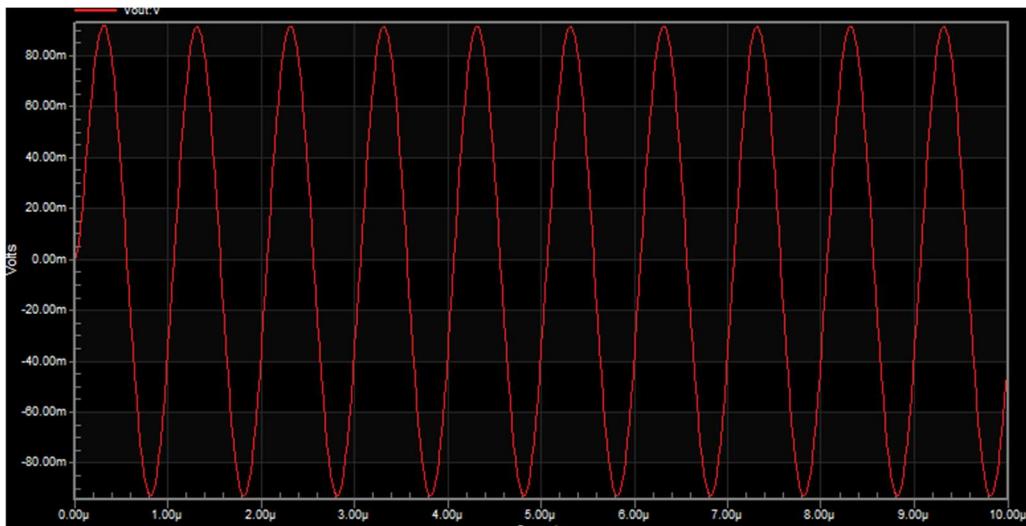


Figura 38- Onda de saída para frequência de 1MHz.

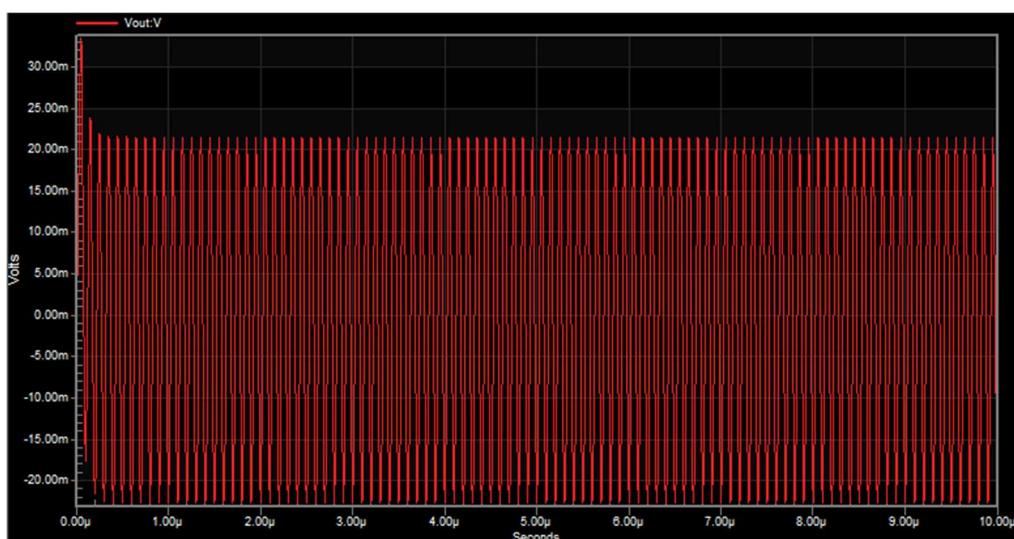


Figura 39- Onda de saída para frequência de 10MHz.

De acordo com os resultados obtidos verifica-se que para frequências de 5kHz e 1 MHz o Ampop apresenta à sua saída a resposta que seria esperada, contudo quando aumentamos a frequência à entrada para 10MHz este deixa de responder de forma correta.

- **Estabilidade**

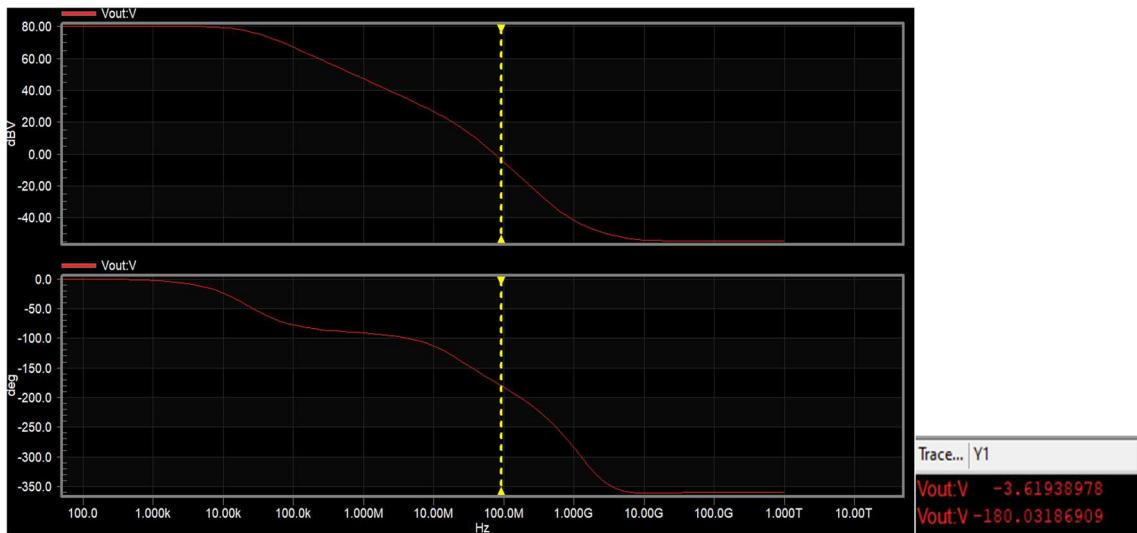


Figura 40- Diagrama de bode e margem de ganho do Ampop.

De modo a retirar a estabilidade do nosso Ampop podemos recorrer à margem de ganho, onde diz que um circuito é estável quando seu ganho a uma dada frequência terá de ser menor que 0dB quando a fase se encontra a 180° , o que de acordo com a resposta em frequência do nosso Ampop se verifica, visto que para 180° o gráfico se encontra a -3dB.

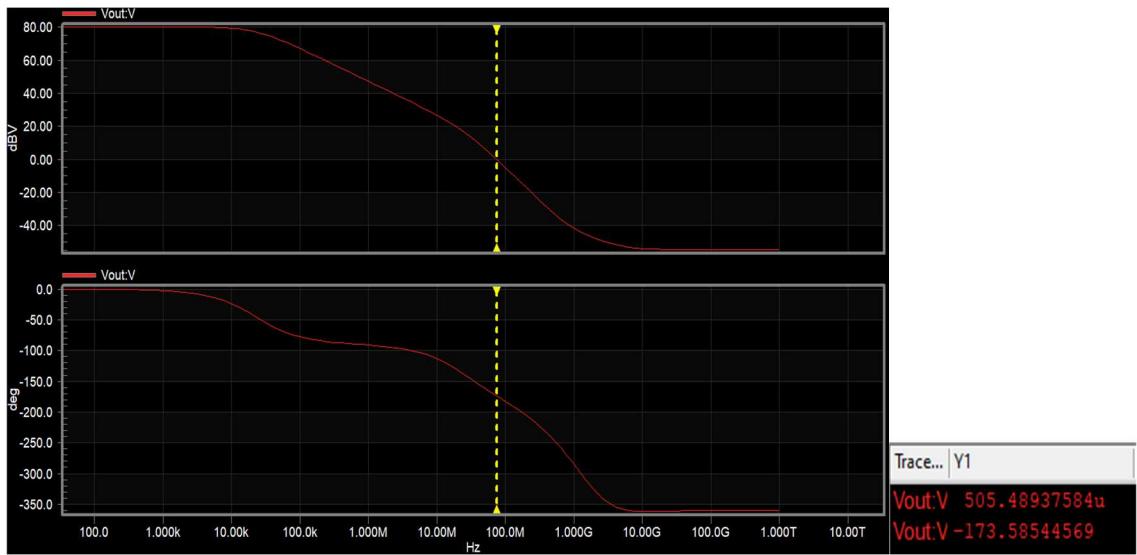


Figura 41- Diagrama de bode e margem de fase do Ampop.

Outro parâmetro que poderá ser analisado é a margem de fase que diz que um circuito é estável quando a sua fase a uma dada frequência terá de ser superior a 180° quando o ganho é de 0dB, o que de acordo com a resposta em frequência do nosso Ampop se verifica, visto que para um ganho de 0dB temos uma fase de -173.5° .

Testes de excursão de saída

De modo a realizar o teste de excursão de saída foi feita a seguinte montagem.

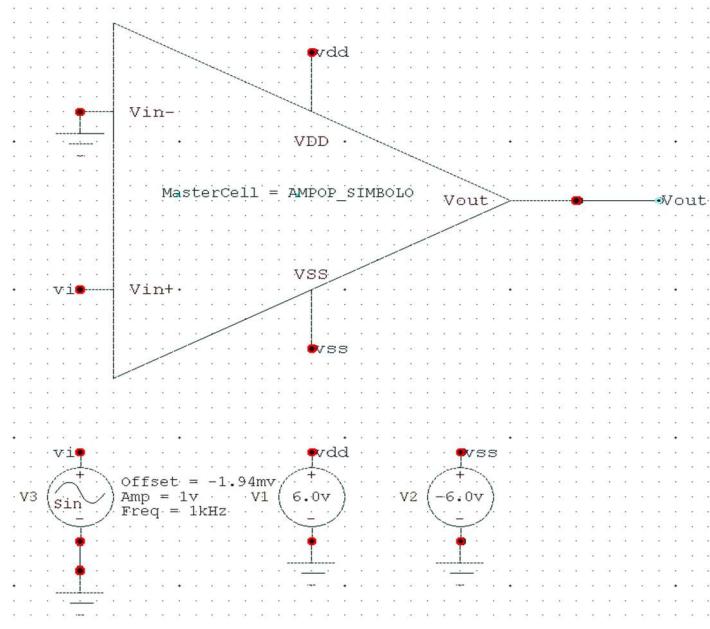


Figura 42- Montagem para teste de excursão de saída sem carga

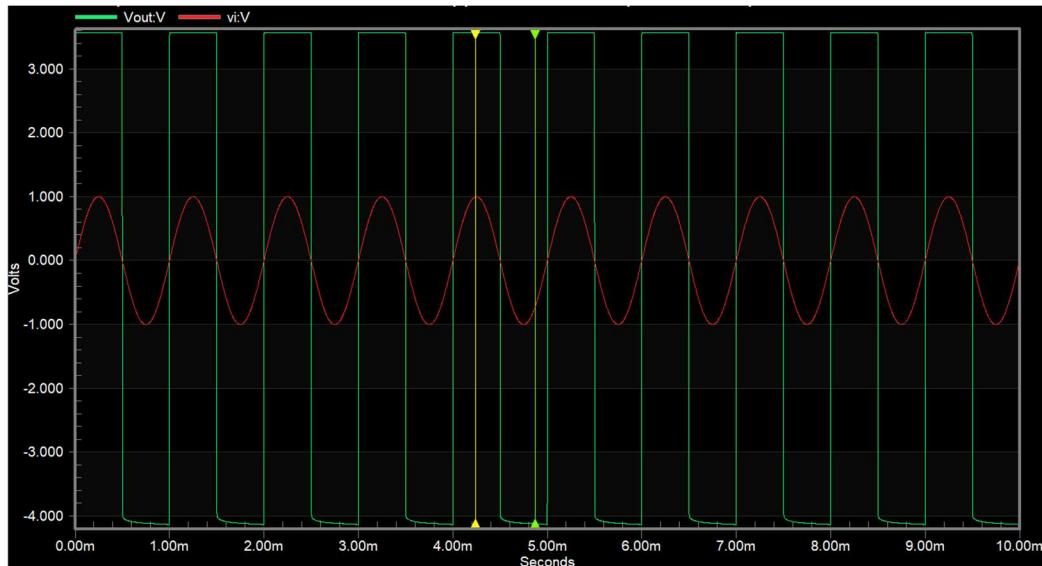


Figura 43- Onda de excursão de saída sem carga.

Trac...	Y1	Y2
Vout:V	3.5704	-4.122
vi:V	997.4097m	-733.503m

Figura 44- Resultados excursão de saída sem carga.

Como resultados da montagem sem resistência de saída obteve-se uma tensão máxima de 3.6V e uma tensão mínima de -4.1V, ou seja, uma excursão de saída de 7.692V.

Realizando agora o mesmo teste para uma resistência de saída de $10\text{ k}\Omega$.

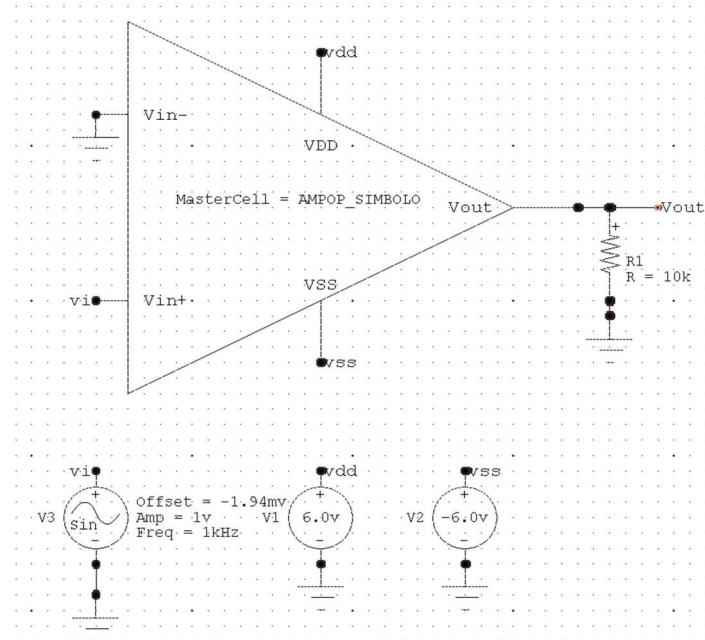


Figura 45- Montagem com carga para testes de excursão de saída.

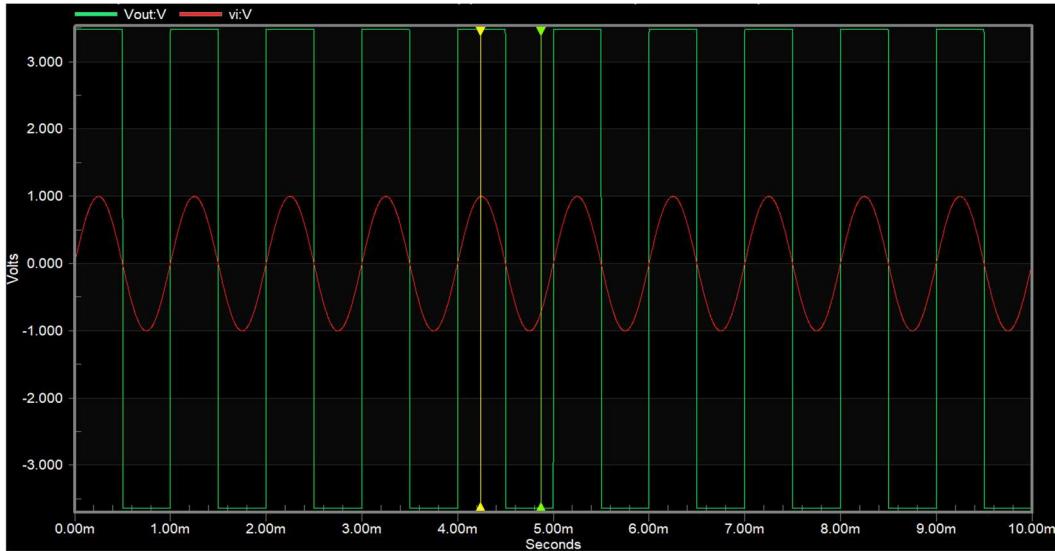


Figura 46- Onda de excursão de saída com carga.

Trac...	Y1	Y2
Vout:V	3.4848	-3.638
vi:V	997.3900m	-733.492m

Figura 47- Resultados de excursão de saída com carga.

Como resultado da montagem com resistência de saída de $10\text{ k}\Omega$ obteve-se uma tensão máxima de 3.48V e uma tensão mínima de -3.6V, isto é, uma excursão de saída de 7.12V.

Desta forma podemos concluir que com resistência o valor da excursão de saída diminui, ou seja, com uma carga e à medida que esta aumenta o valor da excursão de saída diminui.

Testes de excursão de entrada

O amplificador amplifica a diferença entre as duas entradas ($V_{out} = A \cdot V_{dif}$), no entanto, isto não é verdade para todos os valores de entrada, para validar todos os valores de entrada para o nosso Ampop realizaremos o teste de excursão de entrada.

A análise será realizada com a seguinte montagem:

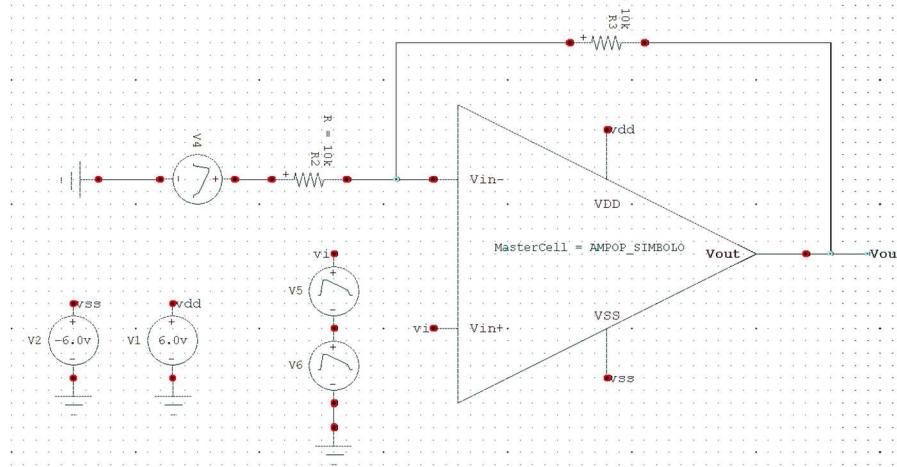


Figura 48- Montagem para testes de excursão de entrada.

- Na entrada V_+ , é inserida uma onda triangular de 0.5V adicionada a uma tensão DC, o que de acordo com a montagem ilustrada forçará a saída a 1V de amplitude centrada em zero;
- O ganho da montagem é definido como $A = \frac{R_3}{R_2} + 1$, visto que as resistências são iguais o ganho será 2;
- A tensão V_4 terá de ser o dobro da tensão de entrada.

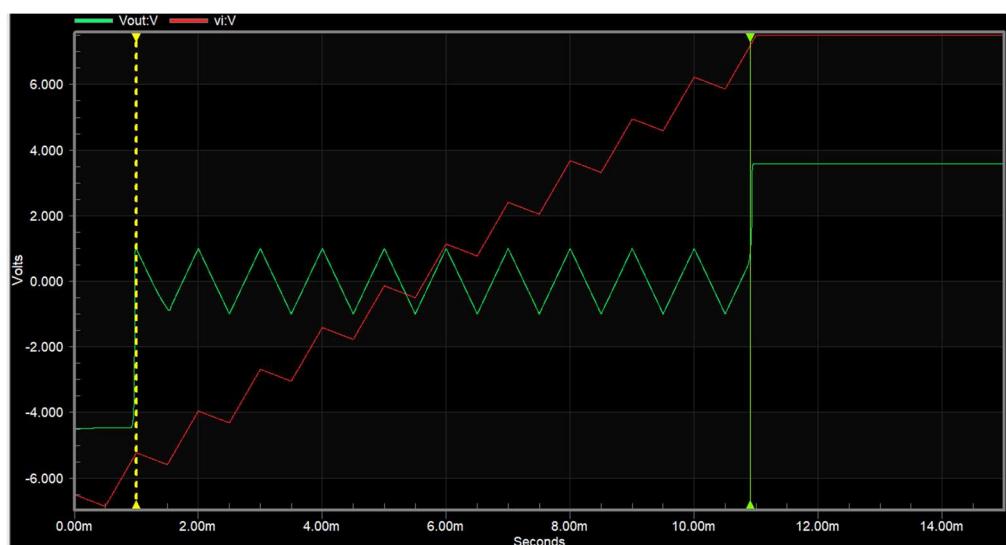


Figura 49- Ondas de testes de excursão de entrada.



Figura 50- Resultados de excursão de entrada.

Retirados os resultados da excursão de entrada podemos realçar que para o Ampop apresentado, a gama de valor que podemos colocar na entrada para que este funcione corretamente vai desde -5.227V até 7.205V, ou seja, uma excursão de entrada de 12.432V.

Testes de CMRR

De maneira a realizar este teste é necessário:

- Corrigir o offset;
- Aplicar uma tensão V_{icm} (AC) em ambas as entradas;
- Medir a tensão de saída V_{ocm} (AC).

Calcular o ganho em modo comum $AMC = \frac{V_{ocm}}{V_{icm}}$

$$CMRR = \frac{Adif}{AMC}$$

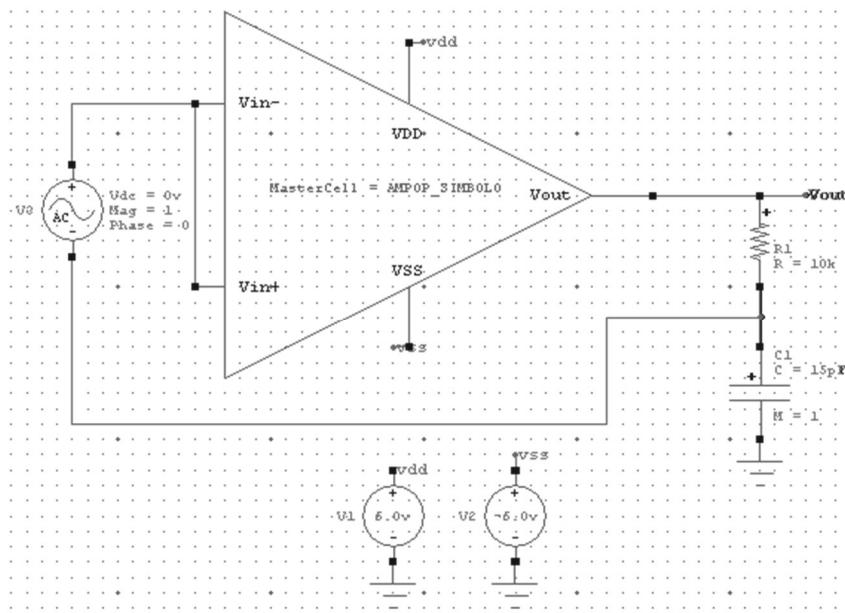


Figura 51- Montagem para testes de CMRR, Acm.

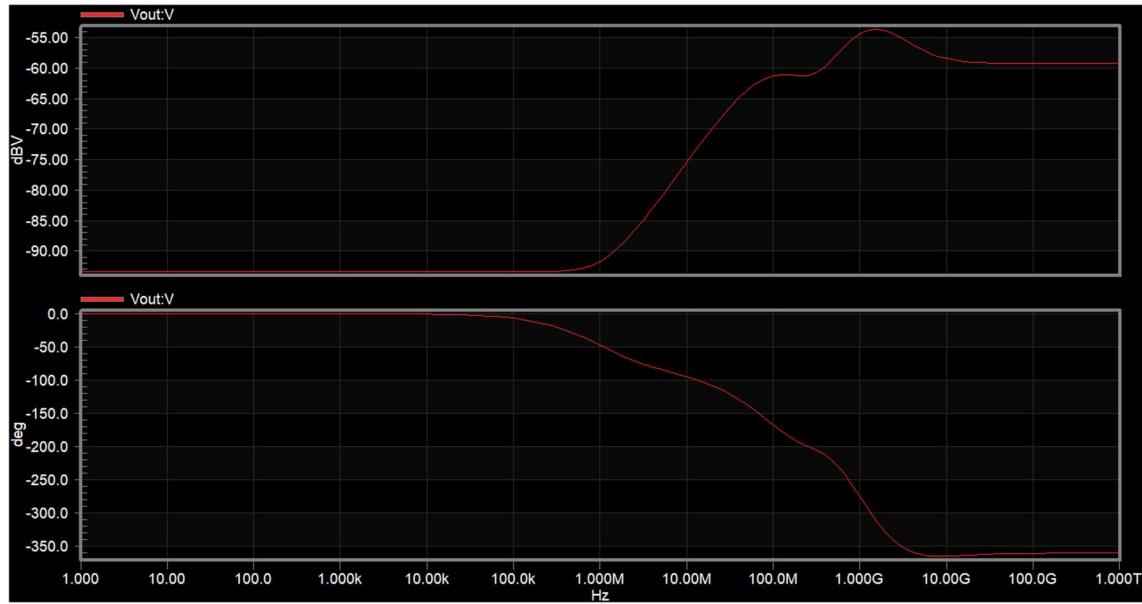


Figura 52- Diagrama de bode de ganho comum.

Colocou-se uma onda sinusoidal com 1V de amplitude nas duas entradas e retirou-se o diagrama visível na imagem anterior. Obtendo-se para o ganho modo comum um ganho de -100dB.

Como estudado anteriormente, o ganho diferencial foi medido usando a seguinte montagem:

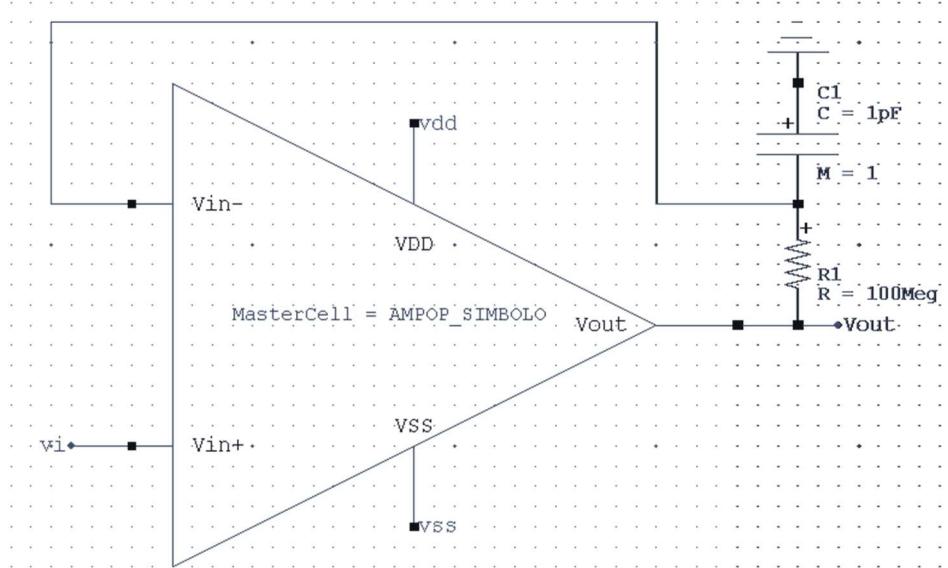


Figura 53- Montagem para testes de CMRR, Adif.

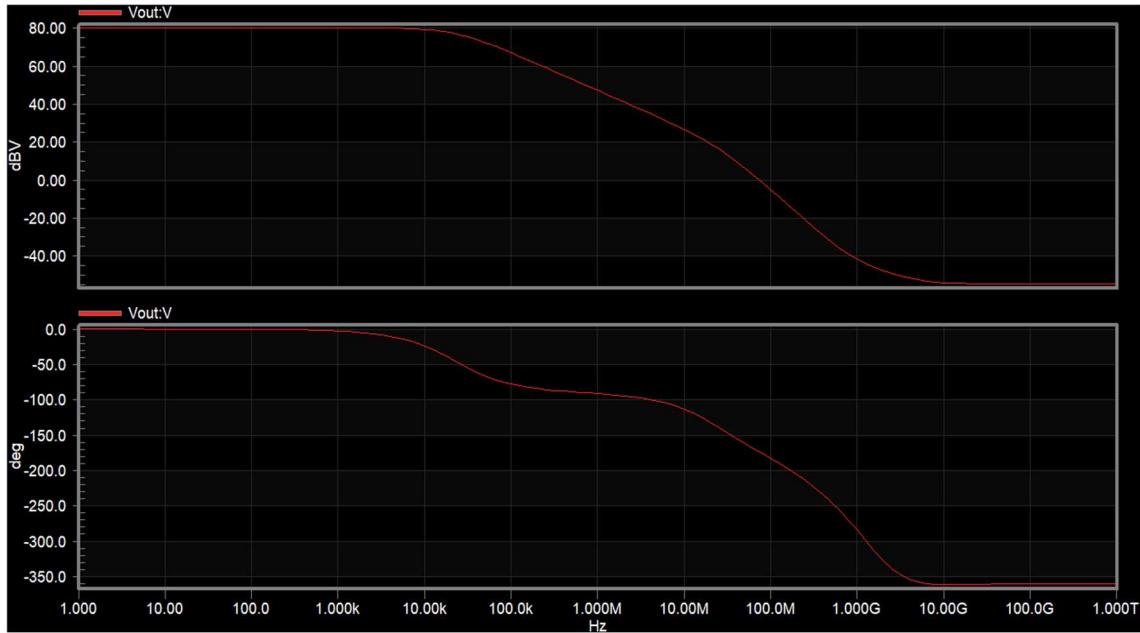


Figura 54- Diagrama de bode de ganho Adif.

Foi retirado o ganho Adif para duas frequências diferentes analisando dessa forma a interferência da frequência no valor de CMRR.

- Para uma frequência de 1KHz.

$$CMRR = Adif(dB) - Acm(db)$$

$$CMRR = 80dB - (-90dB) = 170dB$$

- Para uma frequência de 1MHz.

$$CMRR = Adif(dB) - Acm(db)$$

$$CMRR = 45dB - (-90dB) = 135dB$$

Fazendo uma análise dos diagramas e dos resultados obtidos para as diferentes frequências testadas, verificamos que com uma frequência de 1 kHz o CMRR é de 170 dB, sendo que com 1MHz este desce para 135 dB concluindo-se dessa forma que o CMRR diminui com o aumento da frequência.

Testes de PSRR

Para a realização deste teste foram tomados os seguintes tópicos:

- Corrigido o offset;
- Soma de uma tensão AC à tensão de alimentação;
- Visualização do gráfico de ganho;
- Através da equação $PSRR = \frac{A_{dif}}{A_{ps}}$ retirar o respetivo valor de PSRR.

Foi realizada a seguinte montagem de forma a calcular o valor de PSRR.

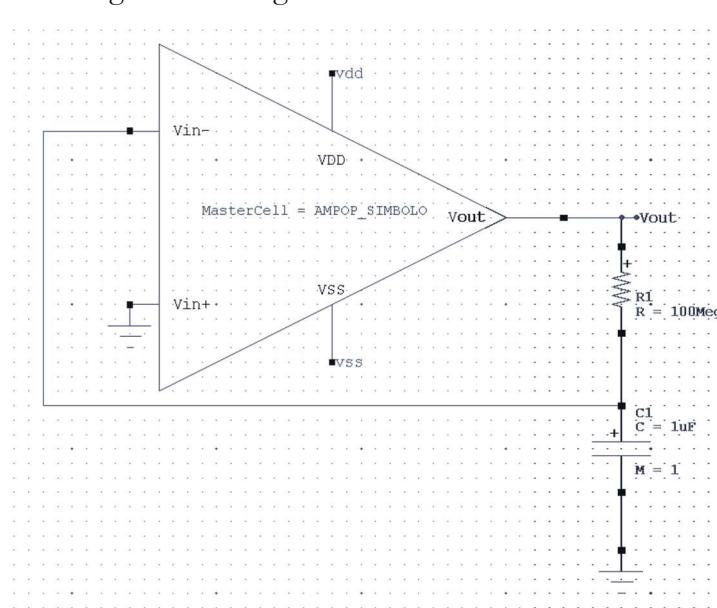


Figura 55- Montagem para testes de PSRR.

- Primeiramente, foi acrescentada uma tensão AC à tensão de alimentação positiva:

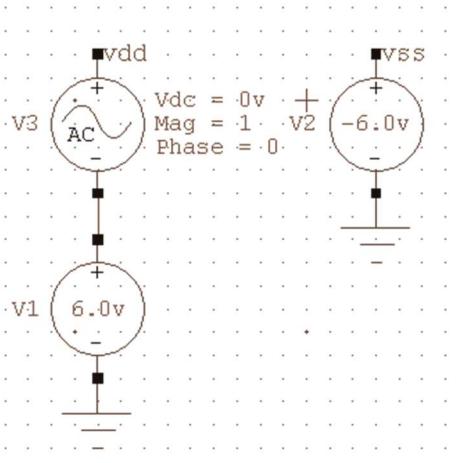


Figura 56- Adição de tensão AC na alimentação.

Retirou-se assim o seguinte diagrama de bode:

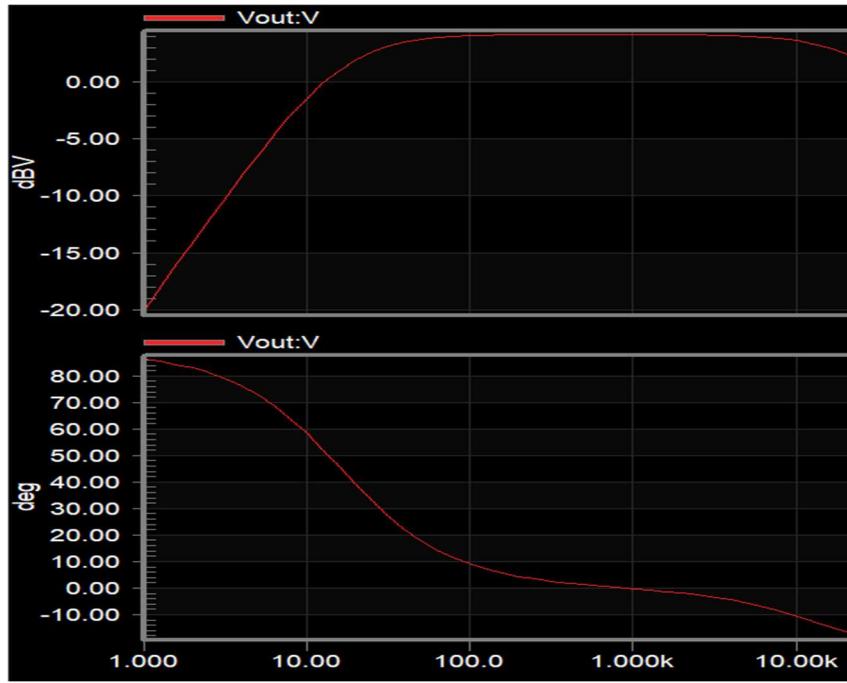


Figura 57- Diagrama de Bode para teste com adição AC na alimentação positiva.

Da análise do diagrama para uma frequência de 3Hz calcula-se um $PSRR = 80\text{dB} - (-10\text{dB}) = 90\text{dB}$.

Já para uma frequência de 1kHz temos um $PSRR = 80\text{dB} - 4\text{dB} = 76\text{dB}$.

- Analisando agora para uma adição na tensão de alimentação negativa obtemos:

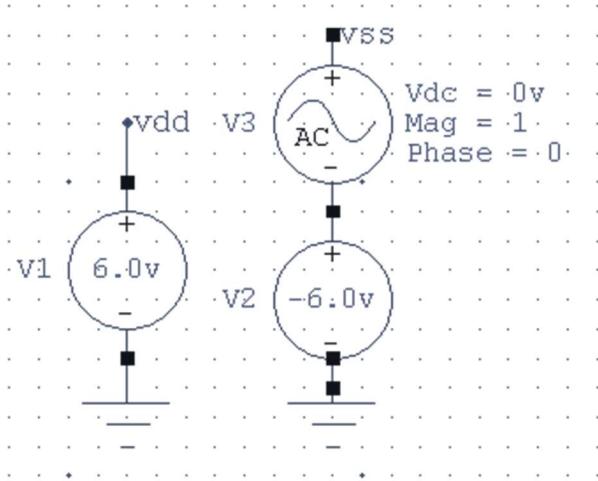


Figura 58- Adição de tensão AC na alimentação negativa

Obteve-se o seguinte diagrama de Bode:

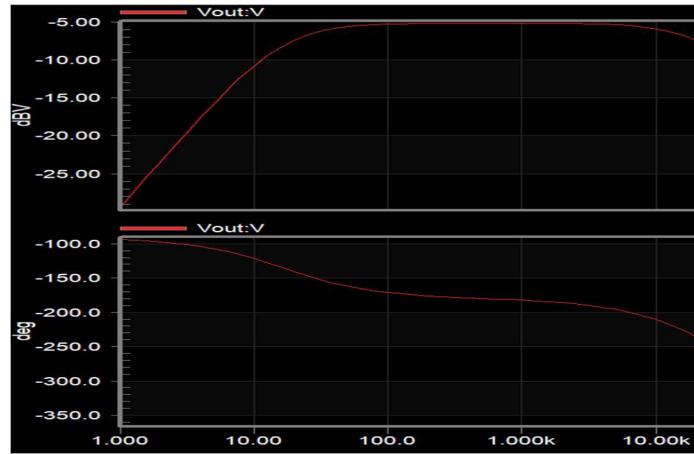


Figura 59- Diagrama de bode para teste com adição AC na alimentação negativa.

Da análise do diagrama para uma frequência de 3Hz apresenta um $PSRR = 80\text{dB} - (-20\text{dB}) = 100\text{dB}$

Para uma frequência de 1kHz temos um $PSRR = 80\text{dB} - (-5\text{dB}) = 85\text{dB}$.

Conclui-se assim que com o aumento da frequência o ganho irá diminuir em ambos os casos (até uma frequência de 10KHz) e que para uma adição de uma perturbação na tensão de alimentação positiva, temos que a perda do ganho será maior.

Testes de Slew-rate

Este teste foi realizado com o intuito de observar o tempo de transição do nosso Ampop, tanto em transições ascendentes como transições descendentes.

A seguinte montagem revela como foi feito o procedimento.

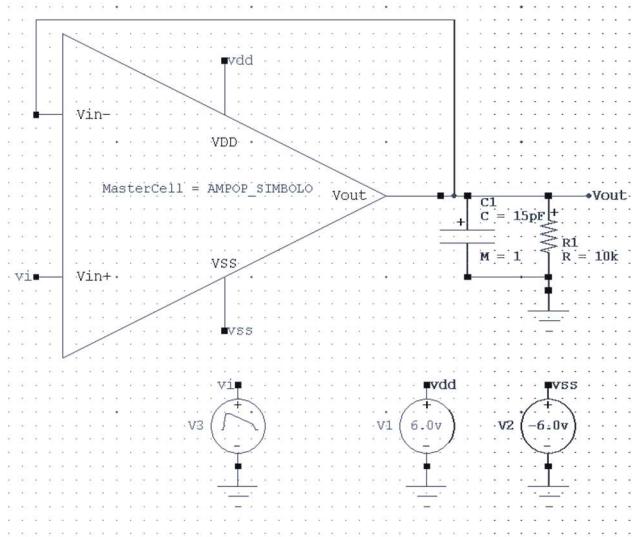


Figura 60- Montagem para teste de slew-rate.

Para uma possível visualização do tempo ascendente obteve-se:

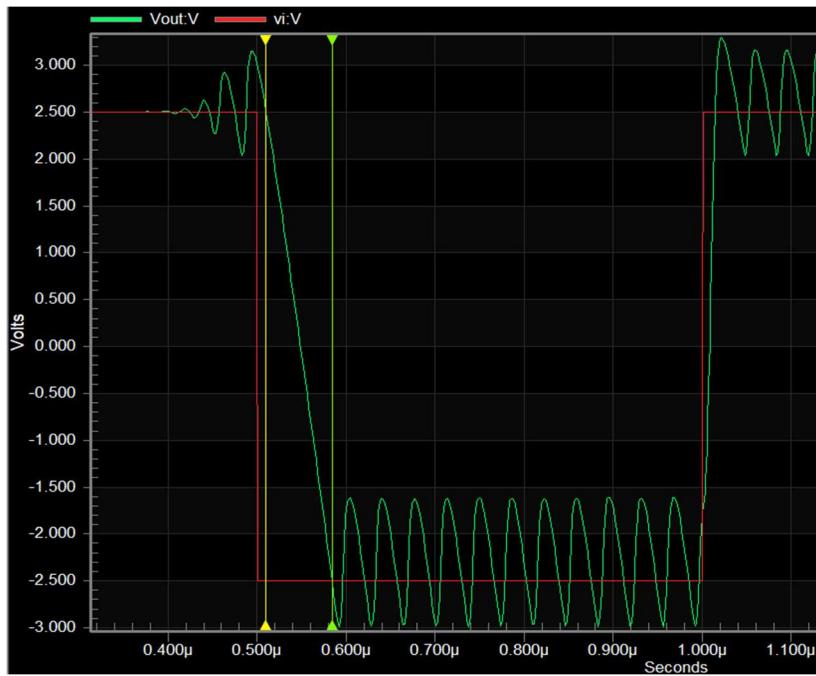


Figura 61- Ondas do teste, descendente de slew-rate.

Trace...	Y1	Y2	Delta	Derivative1	Derivative2	Slope
Vout:V	2.5566	-2.33134	-4.89	-57.5785M	-442.998T	-67.2338M
vi:V	-2.5000	-2.50000	0.00	0.0000	0.000	0.0000

Figura 62- Resultados de teste ascendente de slew-rate

$$\text{Para uma transição descendente: } SR = \frac{-5V}{72ns} = -69.4M$$

Para uma possível visualização do tempo descendente obteve-se:

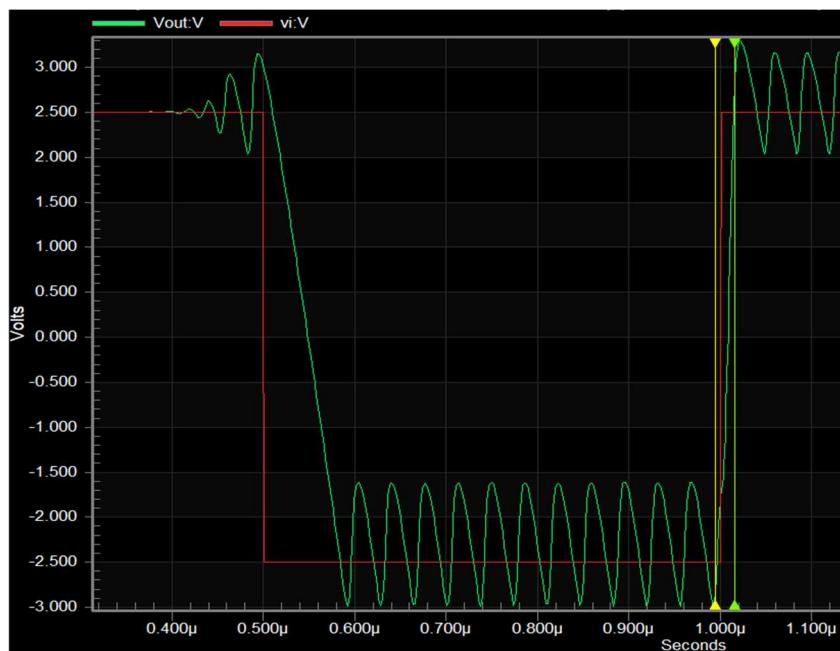


Figura 63- Onda de teste ascendente, slew-rate

Trace...	Y1	Y2	Delta	Derivative1	Derivative2	Slope
Vout:V	-1.7806	2.69230	4.47	101.5255M	-101.e015	304.2792M
vi:V	-1.0001	2.50000	3.50	5.00000G	0.	238.1037M

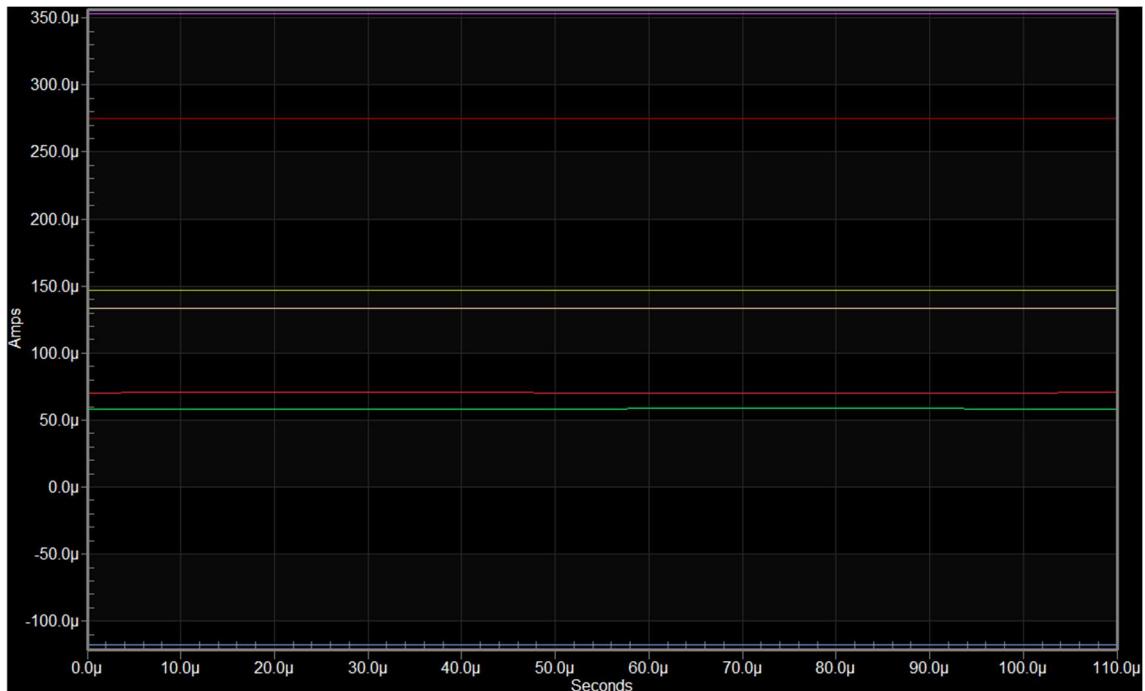
Figura 64- Resultados de teste de slew-rate, transição ascendente

$$\text{Para uma transição ascendente: } SR = \frac{5V}{18ns} = -277.7M$$

Conclui-se que para a transição ascendente gasta-se menos tempo de transição, tornando-o muito mais rápido que a transição descendente. No geral vemos que o Ampop apresenta um slew rate elevado o que representa um bom tempo de resposta do Ampop.

Testes de consumo

Com o seguinte teste é possível observar o consumo de corrente em vazio no amplificador. Nele são medidas as correntes de todos os ramos em vazio de maneira a provar uma das principais características para o qual ele foi desenhado, **baixo consumo**.



Trace Name	Y1
MM12:source:I	70.49136746246558u
MM13:source:I	58.37549785668766u
MM14:source:I	352.96853973609973u
MM18:drain:I	146.61492449930037u
MM1:source:I	274.86247048191706u
MM5:source:I	133.21042584051677u
RR3:1:I	117.48147020228280u

Com a soma dos resultados anteriores obtém-se o valor de corrente consumida em vazio de 1.15mA.

Conclusão

Fazendo um balanço do trabalho desenvolvido, tanto a nível do projeto como caracterização do Ampop podemos denotar que este representa um bom trabalho para se fazer no fim da UC, uma vez que culmina os diversos conteúdos abordados ao longo do semestre.

Quanto uma análise mais técnica do Ampop dimensionado, verificamos que este apresenta uma baixa tensão de alimentação para ganho unitário, uma boa relação entre estabilidade e aproveitamento da gama de frequências, um elevado slew rate e ainda um baixo consumo.

Olhando mais numa perspetiva de trabalho a desenvolver para o futuro, pensamos que os próximos passos seriam ajustar um ou outro ponto que se pudesse melhor e implementar o protótipo físico do Ampop, procedendo de seguida à sua caracterização e validação.