



INSTITUTO SUPERIOR TÉCNICO
MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA ELECTROTÉCNICA E DE
COMPUTADORES

SISTEMAS INTEGRADOS ANALÓGICOS

Design de um Amplificador

João Bernardo Sequeira de Sá	n.º 68254
Maria Margarida Dias dos Reis	n.º 73099
Nuno Miguel Rodrigues Machado	n.º 74236

Lisboa, 3 de Maio de 2015

Índice

1	Introdução	1
2	Funcionamento Teórico do Circuito	2
3	Dimensionamento dos Transístores	4
3.1	<i>Slew-Rate</i>	4
3.2	<i>Slew-Rate</i> , Ganho, Largura de Banda e Margem de Fase	11
3.3	<i>Budget</i> da Corrente	12
4	Conclusões	13

1 Introdução

Pretende-se projectar um amplificador *folded cascode* CMOS OTA de dois andares de acordo com as especificações da seguinte tabela.

Tabela 1: Características do amplificador a projectar.

Especificação	Símbolo	Valor
Tensão de Alimentação	V_{DD}	3.3 V
Ganho para Sinais de Baixa Amplitude	A_v	70 dB
Largura de Banda	Bw	60 kHz
Margem de Fase	PM	60°
Capacidade da Carga	C_L	0.25 pF
<i>Slew-Rate</i>	SR	200 V/ μ s
<i>Budget</i> da Corrente	I_{DD}	400 μ A
Área de <i>Die</i>	/	0.02 mm ²

O circuito de ponto de partida para a realização do projecto é apresentado de seguida.



Figura 1: Circuito do amplificador a projectar.

2 Funcionamento Teórico do Circuito

O circuito a desenvolver é do tipo *folded cascode* CMOS OTA (*Operational Transconductance Amplifier*). Os amplificadores OTA são caracterizados por apresentar ganhos e valores de impedância de saída elevados. O valor elevado da impedância de saída faz com que sejam especialmente indicados para cargas capacitivas podendo, no entanto, servir para cargas resistivas pequenas através de *feedback*.

Quando se compara o *folded cascode* com o *telescopic* observa-se que se tem o dobro da corrente e ganhos muito similares. No entanto, deve-se notar que se tem melhor largura de banda, *slew-rate*, estabilidade e impedância de saída mais elevada. O compromisso por estas qualidades é uma velocidade de resposta inferior, assim como índices de ruído superiores e uma pior resposta na frequência.

Analisando o circuito da Figura 1 em pormenor identificam-se 5 blocos, sendo importante analisar a função de cada um, para que melhor se possa compreender o funcionamento e comportamento do circuito na sua totalidade. O Bloco 1 representa o transístor responsável pela polarização do circuito. O Bloco 2 representa um par diferencial PMOS. O Bloco 3 corresponde a um espelho de corrente *cascode* básico do tipo PMOS. O Bloco 4 actua como isolamento. O Bloco 5 funciona como fonte de corrente que “puxa” sempre I (corrente de M_{11}) para o *ground*.

Relativamente ao par diferencial, o circuito pode funcionar de acordo com três situações:

- $v_{in-} = v_{in+} \rightarrow$ situação 1
- $v_{in-} > v_{in+} \rightarrow$ situação 2
- $v_{in-} < v_{in+} \rightarrow$ situação 3

Na situação 1, cada transístor do par diferencial, M_1 e M_2 , tem metade da corrente que passa em M_{11} e o circuito apresenta o seguinte comportamento.

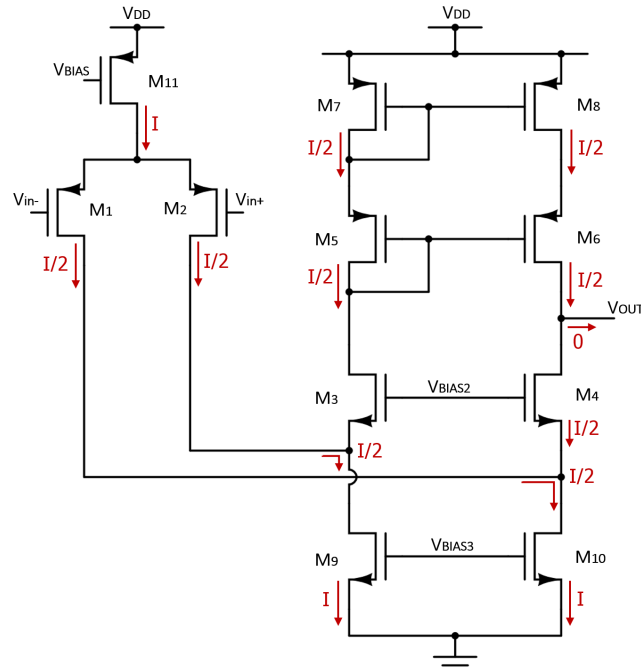


Figura 2: Funcionamento do circuito na situação 1.

Considerando agora o extremo da situação 2, a tensão na *gate* de M_1 toma o valor máximo da fonte de tensão que polariza esse transístor e a tensão na *gate* de M_2 é nula. Assim, o circuito apresenta o seguinte comportamento.

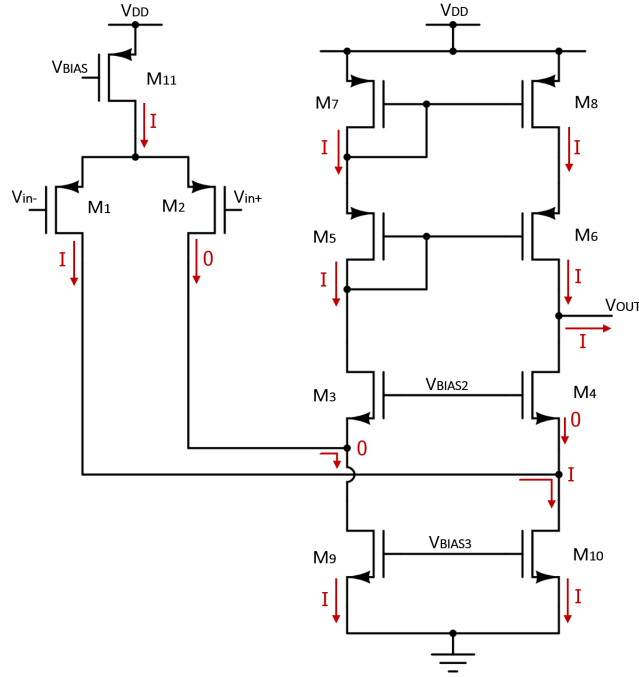


Figura 3: Funcionamento do circuito no extremo da situação 2.

Considerando agora o extremo da situação 3, a tensão na *gate* de M_2 toma o valor máximo da fonte de tensão que polariza esse transístor e a tensão na *gate* de M_1 é nula. Assim, o circuito apresenta o seguinte comportamento.

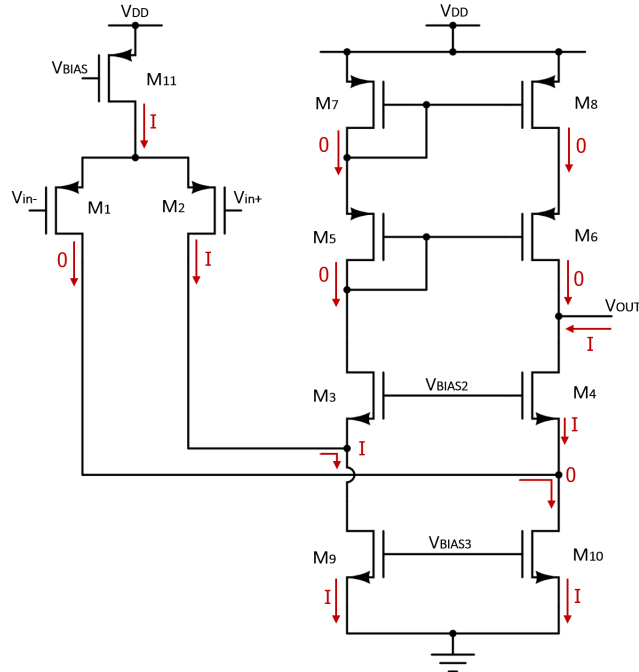


Figura 4: Funcionamento do circuito no extremo da situação 3.

3 Dimensionamento dos Transístores

A primeira fase no projecto do amplificador passou por decidir as dimensões dos vários transístores. Sabe-se que a dimensão de um transístor é dada pelos parâmetros W (*width* - largura) e L (*length* - comprimento).

3.1 *Slew-Rate*

Para efectuar o primeiro dimensionamento dos transístores teve-se em consideração o critério da *slew-rate*, onde se pretende atingir um valor de 200 V/ μ s.

O valor de L ficou decidido à partida como sendo 1 μ m para todos os transístores do circuito, isto porque se tem como *rule of thumb* que, para se evitar o efeito de modulação do comprimento do canal, o valor de L deve ser maior ou igual a 1 μ m. O valor de W pode ser calculado recorrendo à equação que determina a corrente num transístor. Para um transístor do tipo P a corrente é dada por

$$I_D = \frac{1}{2} \mu_n C_{ox} \times \left(\frac{W}{L} \right) \times (V_{GS} - V_{TH}^2) = k_P \times \left(\frac{W}{L} \right) \times V_{OD}^2, \quad (3.1)$$

sendo que para um transístor do tipo N troca o valor do factor de ganho, em vez de k_P tem-se k_N .

Da equação anterior pretende-se determinar o valor de W dos vários transístores, sendo então necessário saber o valor de L (já determinado anteriormente), o valor da corrente que passa nos transístores, I_D , o valor de k e o valor da tensão de *overdrive*, V_{OD} .

O valor da tensão de *overdrive* definiu-se como sendo de 0.2 V para todos os transístores. Este valor deriva de outra *rule of thumb* que indica que se deve escolher para V_{OD} um valor de 0.2V - menos do que isso e fica-se demasiado sensível a V_{TH} e mais do que isso e fica-se com pouca margem de saturação, que é uma medida do quão dentro da saturação se está, sendo calculada por $V_{DS} - V_{OD}$.

O valor de k pode ser obtido com recurso aos *process parameters*, sendo de referir que os valores que se retiram das *datasheets* representam apenas $\mu_n C_{ox}$, pelo que têm de ser multiplicados por 1/2 para que se obtenha o factor de ganho final, como se pode ver na próxima equação, para o caso de um transístor do tipo P:

$$k_P = \frac{1}{2} \mu_n C_{ox} = \frac{1}{2} \times K P_P. \quad (3.2)$$

Os valores já conhecidos que ajudam a obter o valor de W através da equação (2.1) encontram-se esquematizados na seguinte tabela.

Tabela 2: Valores especificados para algumas das características que definem os transístores.

Especificação	Método de Cálculo	Símbolo	Valor
Comprimento	<i>rule of thumb</i>	L	1 μ m
Tensão de <i>Overdrive</i>	<i>rule of thumb</i>	V_{OD}	0.2 V
Factor de Ganho (tipo P) <i>datasheet</i>	<i>process parameters</i>	$K P_P$	58 μ A/V ²
Factor de Ganho (tipo N) <i>datasheet</i>	<i>process parameters</i>	$K P_N$	175 μ A/V ²
Factor de ganho (tipo P)	equação (2.2)	k_P	29 μ A/V ²
Factor de ganho (tipo N)	equação (2.2)	k_N	87.5 μ A/V ²

Para determinar os valores das correntes que passam nos vários transístores começou-se por determinar a corrente máxima à saída do circuito. Existe uma relação entre a *slew-rate*, SR, e a corrente de saída máxima, $I_{out_{max}}$ expressa por

$$SR = \frac{I_{out_{max}}}{C_L}, \quad (3.3)$$

que nos permite concluir que quanto maior for a corrente de saída, mais depressa é carregado o condensador que constitui a carga.

Com os valores da Tabela 1 obtém-se:

$$SR = \frac{I_{out_{max}}}{C_L} \leftrightarrow I_{out_{max}} = 200 \times 0.25 \times 10^{-6} \text{ A} = 50 \text{ } \mu\text{A}. \quad (3.4)$$

Analisando as Figuras 3 a 4 percebe-se que a corrente $I_{out_{max}}$ corresponde a $I/2$, pelo que o valor máximo de I corresponde a $100 \text{ } \mu\text{A}$. O dimensionamento dos transístores foi feito tendo em conta o ponto de funcionamento em repouso (PFR), situação 1, de acordo com

$$W_P = \frac{I_D \times L}{k_P \times V_{OD}^2} \rightarrow \text{transístor tipo PMOS}; \quad (3.5)$$

$$W_N = \frac{I_D \times L}{k_N \times V_{OD}^2} \rightarrow \text{transístor tipo NMOS}. \quad (3.6)$$

Os valores obtidos para a *width* dos vários transístores apresenta-se na tabela seguinte. De notar que os valores foram arredondados ao inteiro mais próximo.

Tabela 3: Valores de W dos transístores que constituem o circuito, calculados em função do PFR.

Transístor	Tipo	Corrente	Observações	W
M1	PMOS	$I_D = I_{max}/2 = 50 \text{ } \mu\text{A}$	/	43 μm
M2	PMOS	$I_D = I_{max}/2 = 50 \text{ } \mu\text{A}$	/	43 μm
M3	NMOS	$I_D = I_{max}/2 = 50 \text{ } \mu\text{A}$	/	14 μm
M4	NMOS	$I_D = I_{max}/2 = 50 \text{ } \mu\text{A}$	/	14 μm
M5	PMOS	$I_D = I_{max}/2 = 50 \text{ } \mu\text{A}$	constitui espelho de corrente com M6 com rácio 1:1	43 μm
M6	PMOS	$I_D = I_{max}/2 = 50 \text{ } \mu\text{A}$	constitui espelho de corrente com M5 com rácio 1:1	43 μm
M7	PMOS	$I_D = I_{max}/2 = 50 \text{ } \mu\text{A}$	constitui espelho de corrente com M8 com rácio 1:1	43 μm
M8	PMOS	$I_D = I_{max}/2 = 50 \text{ } \mu\text{A}$	constitui espelho de corrente com M7 com rácio 1:1	43 μm
M9	NMOS	$I_{Dmax} = I_{max} = 100 \text{ } \mu\text{A}$	/	29 μm
M10	NMOS	$I_{Dmax} = I_{max} = 100 \text{ } \mu\text{A}$	/	29 μm
M11	PMOS	$I_{Dmax} = I_{max} = 100 \text{ } \mu\text{A}$	/	86 μm

De referir que os transístores M_5 e M_6 têm as mesmas dimensões, tal como pretendido, pois formam um espelho de corrente que tem como rácio 1:1. O mesmo se aplica aos transístores M_7 e M_8 .

Com o dimensionamento dos transístores feito procede-se a uma primeira simulação do circuito, com o intuito de verificar o seu funcionamento. Porém, antes de simular o circuito alterou-se a sua polarização, para que em vez de ser feita em tensão seja feita em corrente. Isto é feito porque uma

polarização em corrente permite ter mais controlo, sendo que quando é feita em tensão não se tem garantias dos valores pretendidos.

Assim, o circuito da Figura 1 foi alterado para o apresentado de seguida.



Figura 5: Primeiro circuito de simulação do amplificador.

Na figura anterior pode-se ver o valor de W utilizado nos vários transístores, sendo que para todos o valor de L é de $1 \mu\text{m}$.

Como se pode ver, o transístor M_{11} que é originalmente polarizado em tensão com V_{BIAS} , Bloco 1, foi substituído por um espelho de corrente básico que é polarizado em corrente com I_{BIAS} . A polarização feita com recurso a V_{BIAS2} e V_{BIAS3} foi também alterada para passar a ser feita em corrente com I_{BIAS2} , através de um espelho de corrente *cascode low-voltage*. O valor de I_{BIAS} e de I_{BIAS2} é de $100 \mu\text{A}$.

De notar que os transístores M_{11_1} e M_{11_2} têm a mesma dimensão que aquela que foi determinada para M_{11} , uma vez que a corrente que os atravessa é também $100 \mu\text{A}$ e são do tipo PMOS. Já os transístores M_{12} e M_{14} têm a mesma dimensão que M_9 e M_{10} , uma vez que a corrente que os atravessa é também $100 \mu\text{A}$ e são do tipo NMOS. O transístor M_{13} , de acordo com o funcionamento teórico de um espelho de corrente *cascode low-voltage*, deve ter um W 3 vezes inferior ao de M_{12} , assim como deve funcionar sempre no tródo, o que implica uma *width* de $9 \mu\text{m}$.

Na Figura 6 encontra-se o *schematic* criado no Cadence correspondente ao da Figura 5.

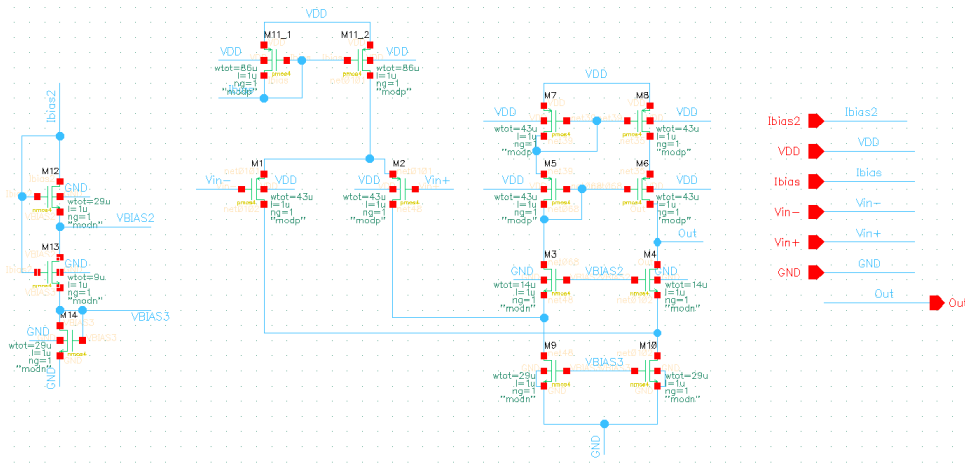


Figura 6: *Schematic* do circuito criado para a primeira simulação.

Com o *schematic* anterior projectou-se um símbolo e criaram-se novos *schematics* de *testbench*, como se pode ver nas Figura 7, 8 e 9.

preciso das
imagens ds
testbenchs

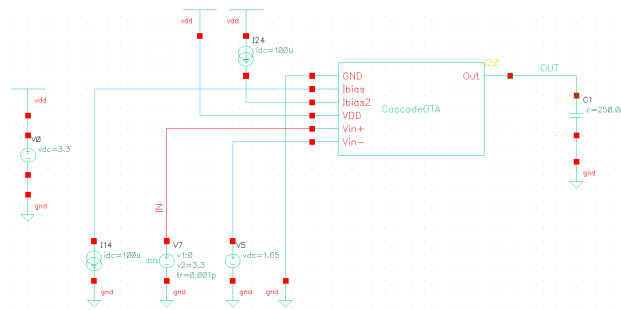


Figura 7: *Schematic* do *testbench* que permite simular o circuito em testes transiente e de resposta DC.

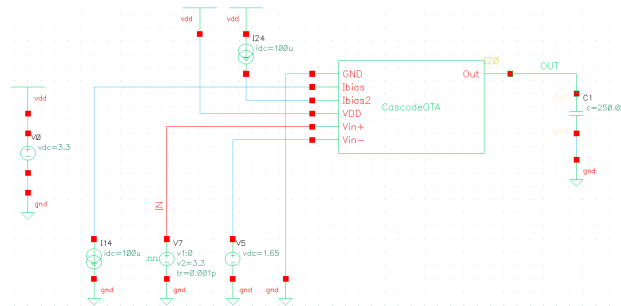


Figura 8: *Schematic* do *testbench* que permite simular o circuito em testes de resposta AC.

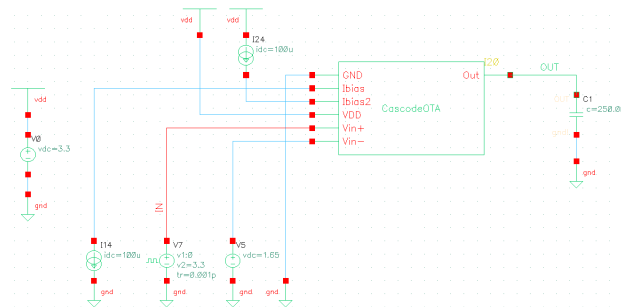


Figura 9: *Schematic* do *testbench* que permite simular o circuito em testes da *slew-rate*.

Recorrendo ao circuito da Figura 7 efectuou-se uma análise transiente durante 2 ms. Para verificar se o circuito funciona como pretendido optou-se por verificar se todos os transístores do amplificador tem a corrente I_D pretendida, ou seja, de acordo com a Figura 1, e se estão na região de saturação.

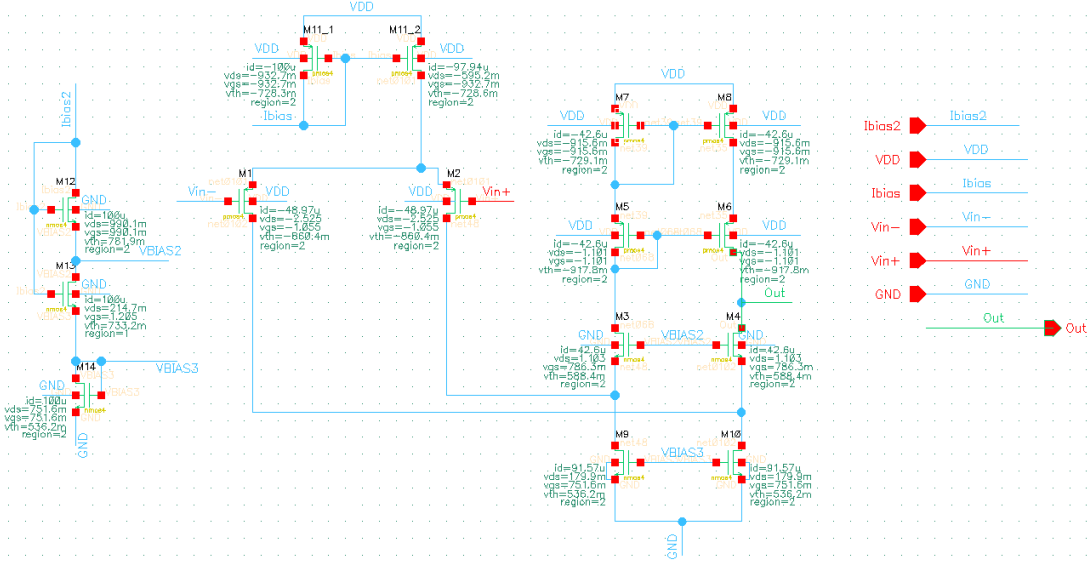


Figura 10: Valores do PFR do *schematic* da Figura 6.

A região de funcionamento dos transístores pode ser vista na secção *region*: 0 implica que o transistor está ao corte, 1 que está no triódo, 2 que está na zona de saturação e 3 na região de *subthreshold*.

Como se pode ver, todos os transístores do amplificador estão na região 2, tal como pretendido, assim como os que polarizam através de I_{BIAS} . Os transístores M_{12} e M_{14} do espelho de corrente *cascade low-voltage* estão também saturados e o transistor M_{13} está no triódo, tal como se queria.

Porém, apesar de os transístores estarem a funcionar na zona correcta, o valor das suas correntes está ligeiramente afastado do pretendido. Os transístores M_3 , M_4 , M_5 , M_6 , M_7 e M_8 deveriam ter um valor de I_D de $50 \mu A$, sendo, no entanto, o valor registado pela simulação de $42.6 \mu A$. Para os transístores M_9 e M_{10} esperava-se um valor de I_D de $100 \mu A$, sendo, no entanto, o valor registado pela simulação de $91.57 \mu A$. As correntes do espelho de corrente básico estão de acordo com o esperado, sendo que os transístores M_1 e M_2 têm um valor de corrente de $48.97 \mu A$, um valor próximo do esperado de $50 \mu A$.

Até agora, para efectuar o dimensionamento dos transístores o critério que se teve em consideração foi a *slew-rate*. Assim, com recurso à calculadora do Cadence calculou-se o seu valor, sendo este de 170.7×10^6 V/segundo $\leftrightarrow 169.9$ V/ μs . O valor pretendido é de 200 V/ μs , verificando-se então alguma diferença entre os dois valores.

Relativamente aos valores de V_{GS} para os vários transístores, os valores teóricos esperados foram calculados com base nos *process parameters* da seguinte forma:

$$V_{TH0P} \approx 0.6V \rightarrow V_{GS} = V_{OD} + V_{THN} = 0.2 + 0.6 = 0.8V \rightarrow \text{transistor tipo PMOS}; \quad (3.7)$$

$$V_{TH0N} \approx 0.5V \rightarrow V_{GS} = V_{OD} + V_{THN} = 0.2 + 0.5 = 0.7V \rightarrow \text{transistor tipo NMOS}. \quad (3.8)$$

Na Figura 10 pode-se verificar que certos transístores do amplificador sofrem de efeito de corpo, ou seja, não têm o *bulk* à mesma tensão que a *source*. Para transístores NMOS tal ocorre se a *source* não estiver ligada a GND e, para transístores PMOS, se a *source* não estiver ligada a VDD.

Quando um transístor sofre de efeito de corpo o seu valor de V_{TH} desvia-se de V_{TH0} (tensão de limiar na ausência de efeito de corpo) e, como tal, a sua tensão V_{GS} toma também valores diferentes. De facto, os transístores PMOS que sofrem de efeito de corpo (M_1 , M_2 , M_5 e M_6), quando comparados aos que não sofrem, apresentam uma tensão de limiar mais afastada do valor da equação (3.7).

Na tabela seguinte pode-se ver as especificações pretendidas e as que se verificam até ao momento, sendo que a verde se assinalam aquelas que se considera cumpridas e a vermelho aquelas que se pretende melhorar. É de referir que ainda não se tem em consideração o critério da área, pois essa é uma preocupação final.

Tabela 4: Especificações actuais do circuito.

Especificação	Valor	
	Teórico	Experimental
Ganho para Sinais de Baixa Amplitude	70 dB	66.01 dB
Largura de Banda	60 kHz	87.45 kHz
Margem de Fase	60°	54.59°
<i>Slew-Rate</i>	200 V/ μ s	169.9 V/ μ s
<i>Budget</i> da Corrente	400 μ A	383.14 μ A
Área de <i>Die</i>	0.02 mm ²	/

Face à ligeira discrepância nos valores obtidos para a corrente nos vários transístores e para a *slew-rate*, decidiu-se proceder a um ajuste nas dimensões dos transístores para se obter valores mais próximos dos esperados. Este ajuste foi feito ao nível dos transístores M_3 e M_4 pois, ao aumentar as suas dimensões faz-se variar as suas tensões V_{GS} , e como tal V_{BIAS2} , o que resulta num aumento da tensão V_{DS} de M_9 , que por sua vez faz aumentar a corrente daquele ramo.

O ajuste feito nesses dois transístores passou por aumentar o seu rácio W/L para o dobro, ou seja, o valor de W passou de $14\mu\text{m}$ para $28\mu\text{m}$. À primeira vista não parecer ser um ajuste fino, no entanto, está associado à existência de um efeito de segunda-ordem.

De facto, quando se é mais criterioso, a corrente de um transístor não é calculada de acordo com a equação (2.1), mas sim de acordo com

$$I_D = \frac{1}{2} \mu_n C_{ox} \times \left(\frac{W}{L} \right) \times (V_{GS} - V_{TH}^2) \times (1 + \lambda V_{DS}) = k_P \times \left(\frac{W}{L} \right) \times V_{OD}^2 \times (1 + \lambda V_{DS}). \quad (3.9)$$

Como se pode ver, sobre o valor da corrente existe um efeito de segunda-ordem com a introdução da parcela $(1 + \lambda V_{DS})$. Assim se explica que, quando o valor de W de M_3 e M_4 passa para o dobro, a corrente nos transístores aumenta em aproximadamente $7\mu\text{A}$, conseguindo-se obter o valor desejado de $50\mu\text{A}$.

Os transístores M_9 e M_{10} também viram as suas dimensões alteradas e, após um ajuste fino, o seu valor de W passou de $29\mu\text{m}$ para $30\mu\text{m}$. Fizeram-se mais ajustes finos, sendo que o transístor M_{12}

passou para um W de $28\mu\text{m}$ e o transistor M_{13} para um W de $7\mu\text{m}$. Estes ajustes nos transístores foram feitos com o objectivo de melhorar a corrente dos respectivos ramos.

Na Figura 11 apresenta-se o circuito com o ajuste nas dimensões dos transístores.

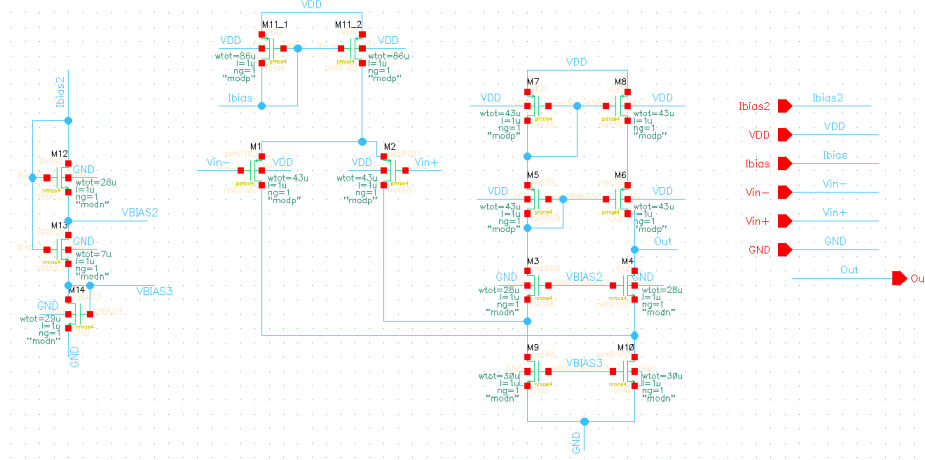


Figura 11: *Schematic* do circuito com os valores de W ajustados.

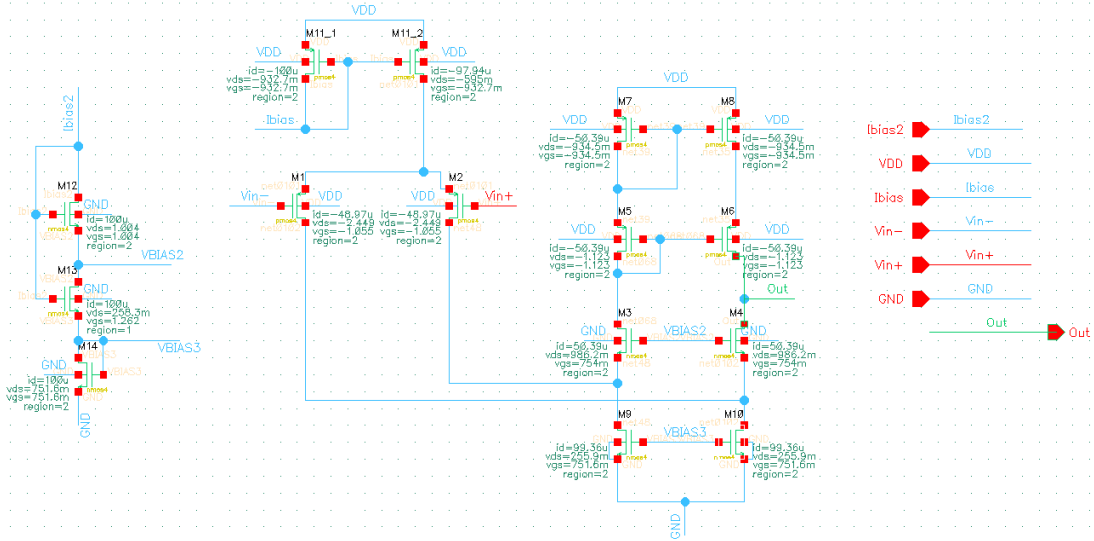


Figura 12: Valores do PFR do *schematic* da Figura 9.

Como se pode ver na figura anterior, o valor da corrente nos transístores M_3 a M_8 passou para $50.39\mu\text{A}$, um valor muito próximo do pretendido de $50\mu\text{A}$. Relativamente aos transístores M_9 e M_{10} , passaram a ter uma corrente de $99.36\mu\text{A}$, um valor também bastante próximo do pretendido de $100\mu\text{A}$.

Face a estes ajustes mediu-se novamente o valor da *slew-rate* para verificar se o critério já é cumprido. O valor medido foi de $199.9 \times 10^6 \text{ V/segundo} \leftrightarrow 199.9 \text{ V}/\mu\text{s}$, um valor que se considera óptimo.

Assim, o estado actual do circuito é apresentado de seguida.

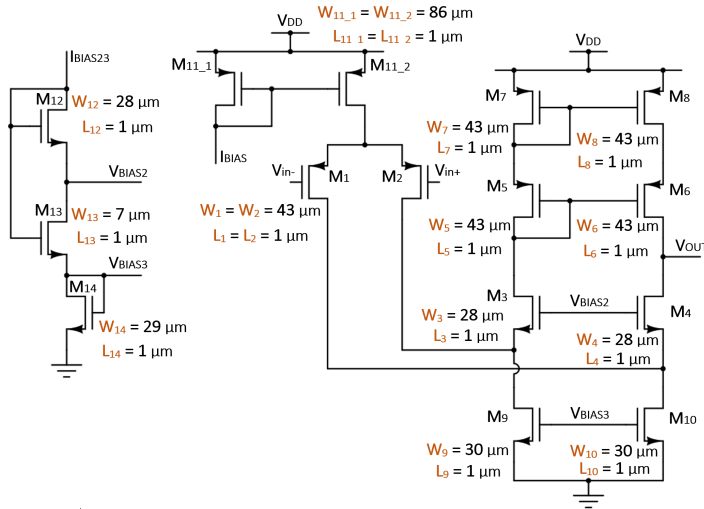


Figura 13: Circuito actual.

Tabela 5: Especificações.

Especificação	Valor	
	Teórico	Experimental
Ganho para Sinais de Baixa Amplitude	70 dB	75.01 dB
Largura de Banda	60 kHz	35.56 kHz
Margem de Fase	60°	52.51°
<i>Slew-Rate</i>	200 V/µs	199.9 V/µs
<i>Budget</i> da Corrente	400 µA	398.72 µA
Área de Die	0.02 mm²	/

3.2 *Slew-Rate*, Ganho, Largura de Banda e Margem de Fase

Por análise da tabela anterior, verifica-se que o valor da largura de banda corresponde a metade do pretendido, sendo que depois se torna mais complicado conseguir recuperar sem comprometer a *slew-rate* já obtida.

Assim, optou-se por uma nova abordagem em que fica decidido não alterar o rácio W/L dos transístores, com vista a não modificar o valor da sua transcondutância e não comprometer a sua região de funcionamento.

Olhando então para o primeiro ajuste feito, optou-se por modificar o valor de L dos transístores M_3 e M_4 de maneira igual à modificação de W , ou seja, L passa para $2\mu\text{m}$. Face a esta modificação o circuito comporta-se da seguinte maneira.

no M12 e M13 também se fez o ajuste do L para manter o rácio? assim alterámos gm. O mesmo para M9 e M10

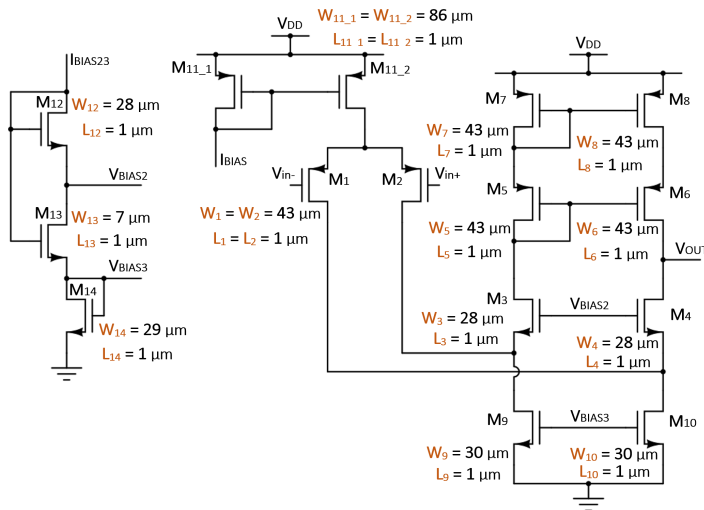


Figura 14: Circuito actual.

Tabela 6: Especificações.

Especificação	Valor	
	Teórico	Experimental
Ganho para Sinais de Baixa Amplitude	70 dB	70.13 dB
Largura de Banda	60 kHz	55.11 kHz
Margem de Fase	60°	44.66°
<i>Slew-Rate</i>	200 V/µs	171.4 V/µs

Como se poder pela Tabela 6, a *slew-rate* desceu drasticamente face ao valor da Tabela 5. Assim, conclui-se que passar o rácio W/L dos transístores M_3 e M_4 para o dobro é muito e optou-se por aumentar, numa primeira fase, em 30%. Optou-se também nesta altura por ter em consideração o critério do ganho, da largura de banda e da margem de fase - tomou-se esta decisão pois uma análise teórica de todos estes factores revela o quão afectados são uns pelos outros.

Veja-se: o ganho do circuito é dado pela equação (3.10) e a largura de banda, que está associada à frequência do pólo dominante, é dada pela equação (3.11) tal como se pode ver de seguida. A margem de fase é afectada por .

referir o que afecta PM

$$A_v = g_{m_1} R_o = g_{m_1} [(g_{m_4} r_{o_4} (r_{o_2} // r_{o_{10}})) // (g_{m_6} r_{o_6} r_{o_8})]; \quad (3.10)$$

$$f_p = \frac{1}{2\pi C_L R_o} = \frac{1}{2\pi C_L [(g_{m_4} r_{o_4} (r_{o_2} // r_{o_{10}})) // (g_{m_6} r_{o_6} r_{o_8})]}. \quad (3.11)$$

Face aos valores da Tabela 4, conclui-se que o pretendido é diminuir o ganho para sinais de baixa amplitude e aumentar a largura de banda. Por análise das equações anteriores percebe-se que o parâmetro comum às duas é R_o , resistência de saída do amplificador *folded cascode*, pelo que o que se pretende é diminuir o valor desse parâmetro.

rever esta parte de baixo - agora é diferente

O valor de R_o depende das resistências de saída de M_2 (r_{o_2}), M_4 (r_{o_4}), M_6 (r_{o_6}), M_8 (r_{o_8}) e M_{10} ($r_{o_{10}}$) e também da transcondutância de M_4 (g_{m_4}) e M_6 (g_{m_6}).

3.3 *Budget* da Corrente

4 Conclusões

Notes

<div></div> preciso das imagens ds testbenchs	7
<div></div> no M12 e M13 tambem se fez o ajuste do L para manter o racio? assim alterámos gm. O mesmo para M9 e M10	11
<div></div> referir o que afecta PM	12
<div></div> rever esta parte de baixo - agora é diferente	12