

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

**ANA PAULA PRINCIVAL MACHADO
MATHEUS HENRIQUE SILVEIRA SANTANA**

RELATÓRIO 2 – ESPELHOS DE CORRENTE

**TE332 – LABORATÓRIO DE ELETRÔNICA ANALÓGICA II
PROFESSOR BERNARDO LEITE**

CURITIBA

2022

2.1. ESPELHOS DE CORRENTE NMOS

a) Como primeiro passo neste relatório, foi necessário criar um espelho de corrente NMOS Simples, como mostrado no esquemático da Fig. 1. Então foi criado um símbolo quadrado para ele, como mostrado na Fig. 2.

Então foi criado um espelho de corrente NMOS Wilson, como mostrado na Fig. 3. O seu símbolo, também quadrado, é mostrado na Fig. 4. Para ambos os espelhos foi utilizado $W = 2,5 \mu\text{m}$ e $L = 0,25 \mu\text{m}$, como destinado à equipe.

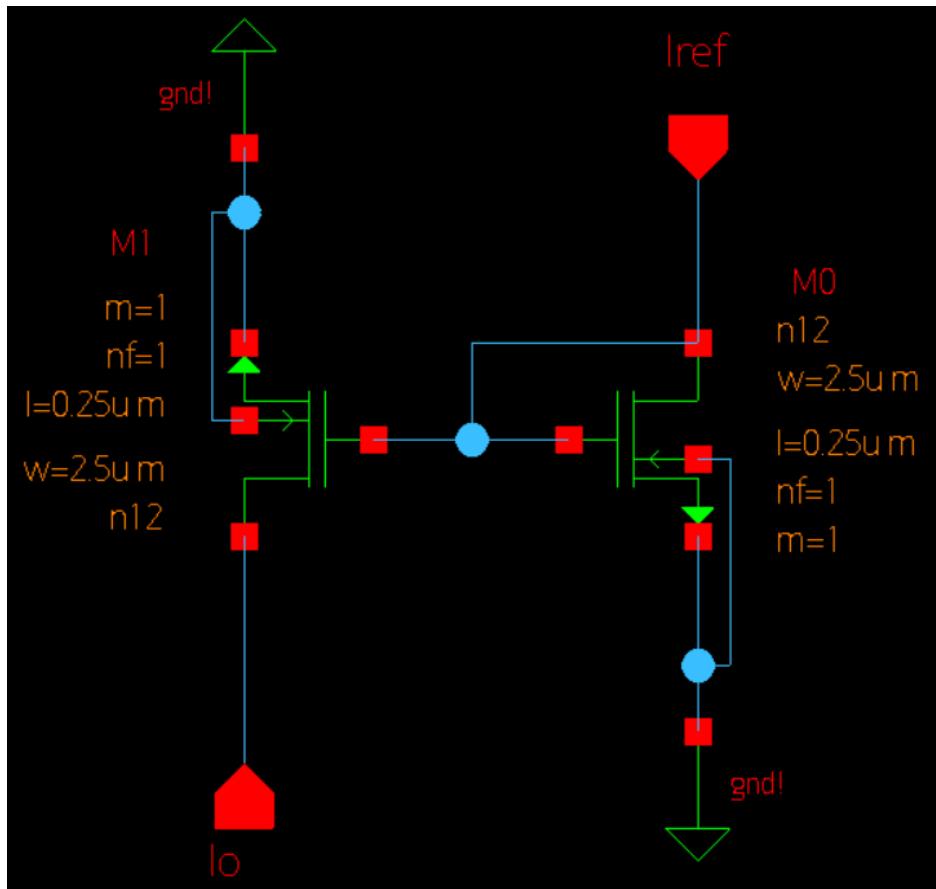


Fig. 1 – Esquemático Espelho de Corrente NMOS Simples

Fonte: Os autores

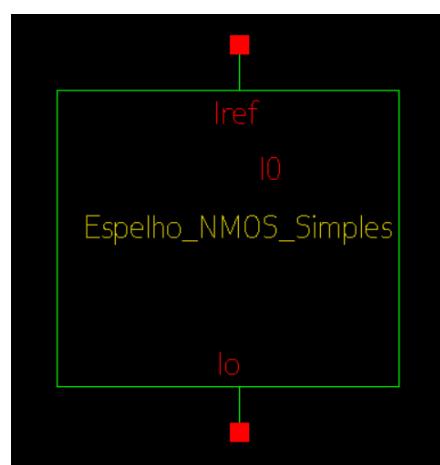


Fig. 2 – Símbolo Espelho de Corrente NMOS Simples

Fonte: Os autores

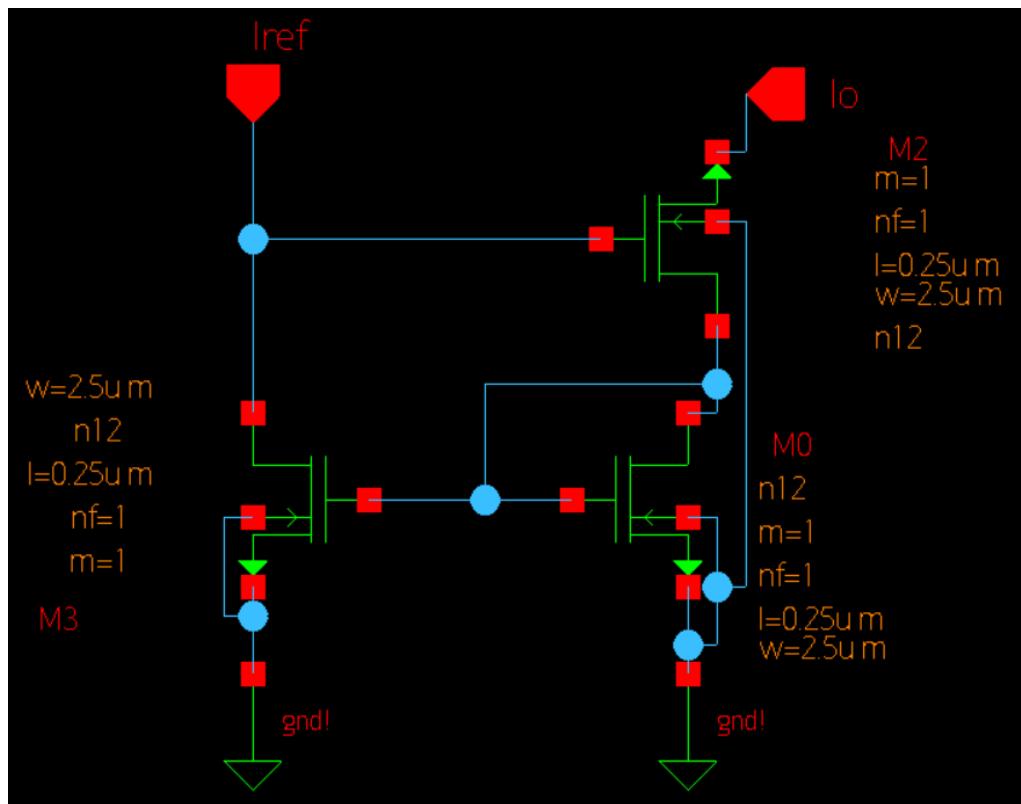


Fig. 3 – Esquemático Espelho de Corrente NMOS Wilson
Fonte: Os autores

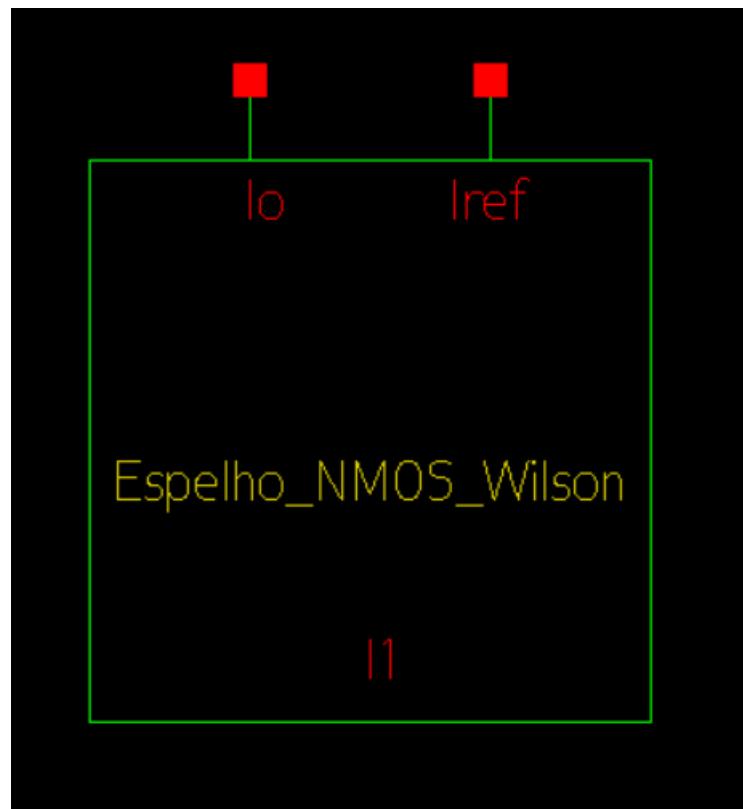


Fig. 4 – Símbolo Espelho de Corrente NMOS Wilson
Fonte: Os autores

- b) Então é necessário criar um esquemático aplicando uma fonte de corrente ideal de

$25 \mu\text{A}$ na entrada de cada espelho, como mostrado na Fig. 5.

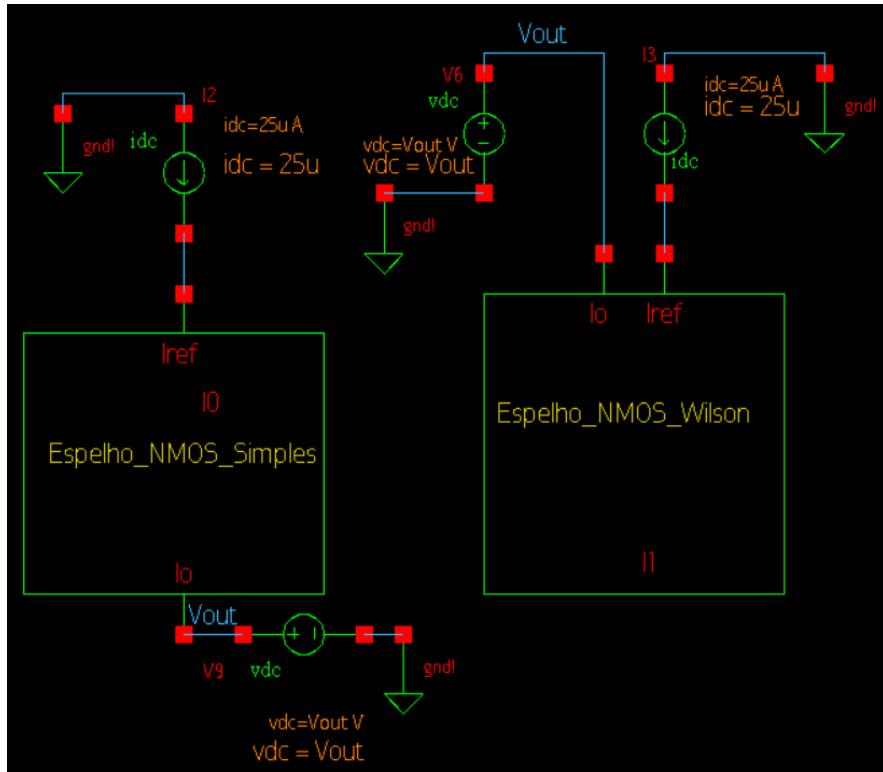


Fig. 5 – Esquemático dos Espelhos NMOS

Fonte: Os autores

Foi feita a simulação conforme o enunciado (variando V_{out} de 0 a V_{dd}), e então foi obtido o gráfico da Fig. 6, que apresenta a curva de ambos os espelhos. V_{dd} é 1,2 V, como anteriormente especificado.

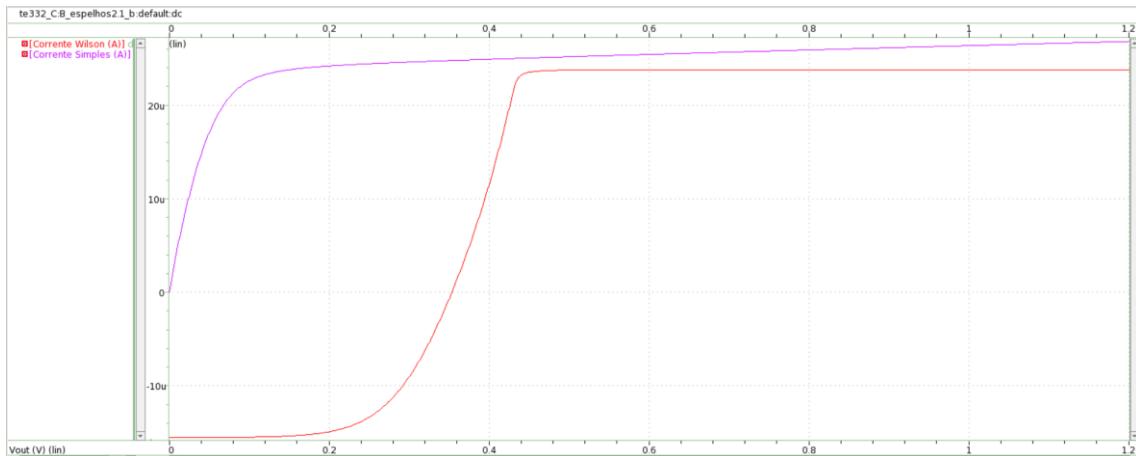


Fig. 6 – Simulação correntes de saída por tensão de saída NMOS

Fonte: Os autores

c) Então foi solicitada a análise de faixa de operação. Pela Fig. 6 é possível notar que o Espelho de Corrente Simples possui uma maior faixa de operação quanto à tensão de saída, já que a corrente é afetada por V_{out} desde o início da simulação. Pode-se notar que o Simples atinge mais de $20 \mu\text{A}$ em aproximadamente 80 mV em V_{out} , enquanto o de Wilson atinge esta faixa de corrente somente perto de 400 mV em V_{out} .

d) Então é necessário analisar qual espelho possui melhor resistência de saída. Com base no gráfico da Fig. 6, pode-se dizer que o Espelho de Wilson possui uma melhor resistência de saída, uma vez que sua corrente varia pouco em função de V_{out} e atua em grande parte como um espelho de corrente.

e) Então é necessário dimensionar a largura dos transistores no Espelho Simples para obter uma corrente de saída igual à tensão de entrada, com diferença máxima de 0,5%. A corrente de entrada é de $25 \mu\text{A}$, e a faixa de 0,5% para mais ou para menos compreende de $24,875 \mu\text{A}$ a $25,125 \mu\text{A}$.

Para isso foi feita uma análise com variação de largura (utilizando o método gráfico) para o Espelho Simples. Como mostrado na Fig. 7, mudamos o W de ambos transistores para “ Wa ” e “ Wb ”.

Foi fixado o valor de Wa em $2 \mu\text{m}$, enquanto o valor de Wb foi variado de $1 \mu\text{m}$ até $10 \mu\text{m}$, ao passo de $1 \mu\text{m}$. Foi plotada a corrente em função da tensão de saída, como mostra a Fig. 8. Nessa figura pode-se ver que a curva azul que corresponde a $Wb = 2 \mu\text{m}$ está mais próxima do valor desejado, pois quando $V_{out} = V_{dd}/2$, apresenta uma corrente de $25,4 \mu\text{A}$. No entanto, esse valor está aquém do permitido, e assim deve-se “fechar” mais o intervalo com maior assertividade. Nos gráficos são plotados as correntes de saída em função da corrente de entrada.

Assim, foram feitas algumas variações do intervalo até chegar a uma plausível, que foi quando foi variado Wb de $1,9 \mu\text{m}$ até $2,1 \mu\text{m}$, ao passo de $0,01 \mu\text{m}$. As curvas obtidas de corrente em função de V_{out} são mostradas na Fig. 9, e nela pode-se identificar que quando $Wb = 2,03 \mu\text{m}$ há uma corrente de $25 \mu\text{A}$ em $0,6 \text{ V}$, que é exatamente a corrente de entrada. Assim, $Wb = 2,03 \mu\text{m}$ é um valor aceito pela tecnologia, pois corresponde a 2030 nm (que é um múltiplo de 5 nm), bem como $Wa = 2 \mu\text{m}$. Dessa forma, na Fig. 10 pode ser observado o novo esquemático com os valores que levam a essa corrente ideal.

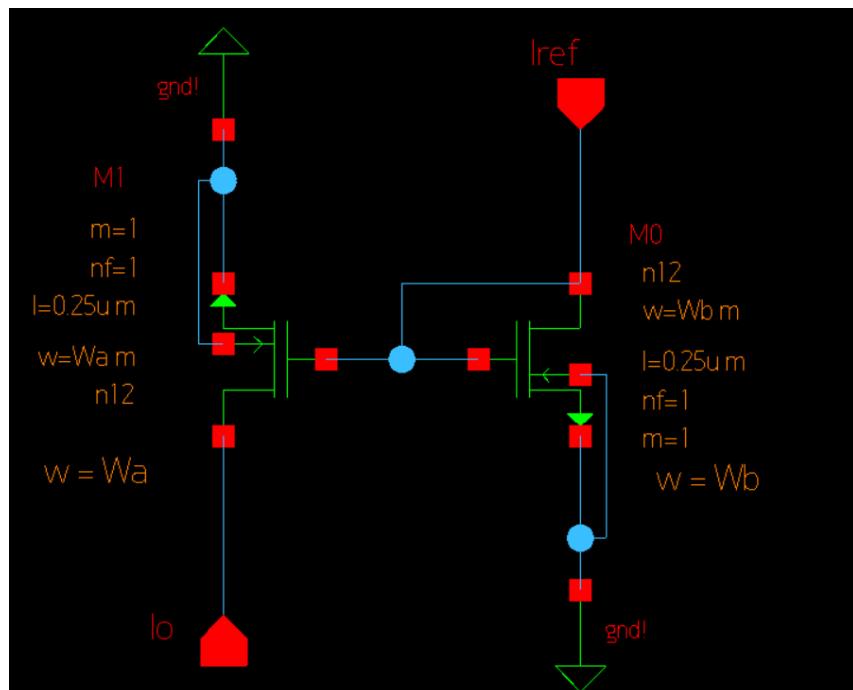


Fig. 7 – Esquemático do Espelho Simples NMOS com variação de W .
Fonte: Os autores

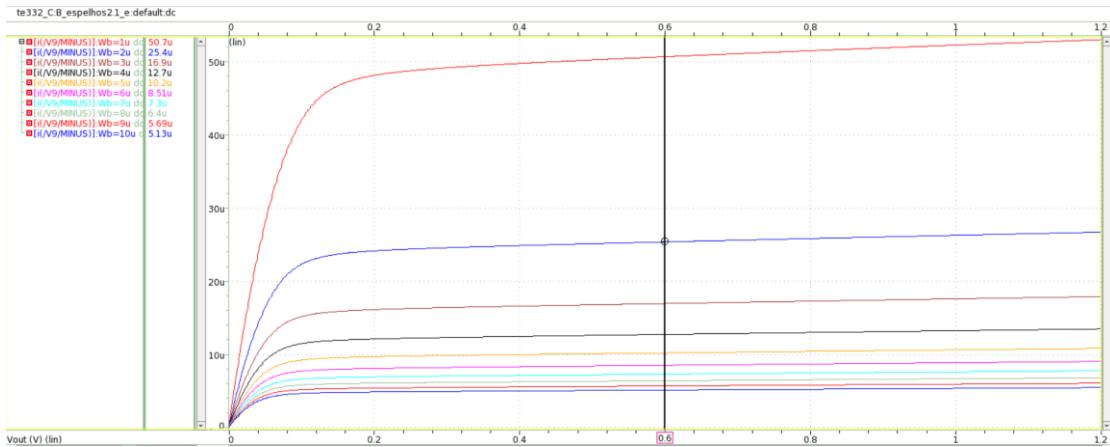


Fig. 8 – Gráficos da corrente em função de V_{out} com primeira variação de W_b
Fonte: Os autores

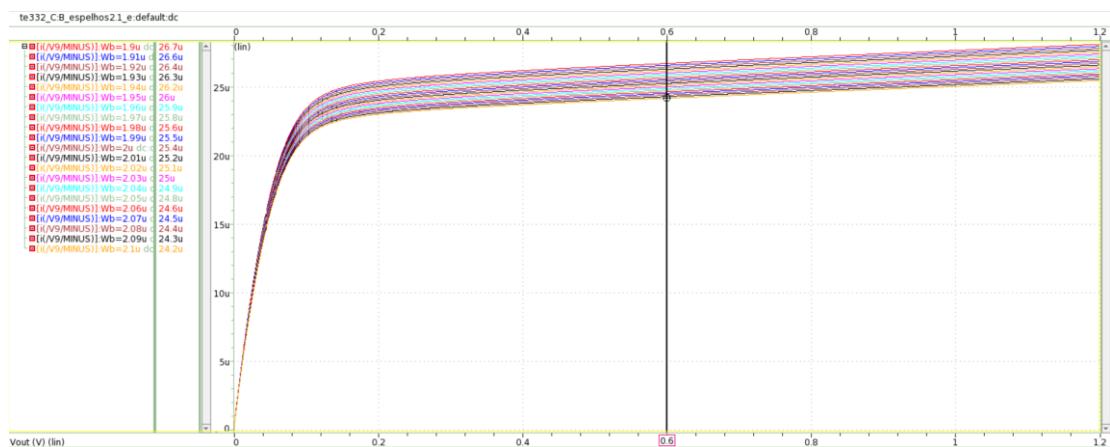


Fig. 9 – Gráficos da corrente em função de V_{out} com segunda variação de W_b
Fonte: Os autores

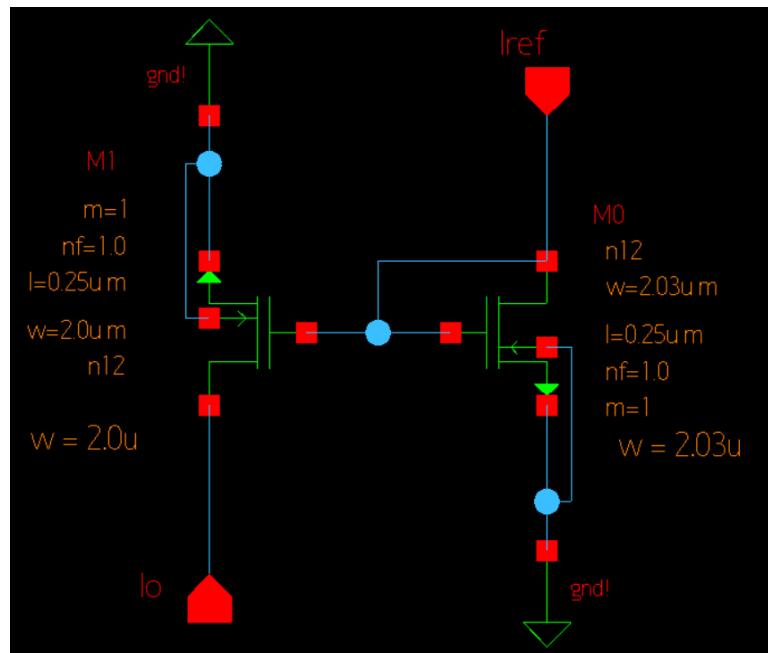


Fig. 10 – Esquemático do Espelho Simples NMOS com larguras definidas
Fonte: Os autores

f) Então neste item é necessário fazer o mesmo procedimento para o Espelho de Wilson. Dessa forma, foi aberto o esquemático desse espelho e prosseguido da mesma forma que no item anterior, definindo W_a e W_b e W_c (uma vez que essa topologia apresenta mais um transistor) e fazendo a variação de W_c , a fim de encontrar um intervalo (e posteriormente um valor) que leve a corrente de saída bem próxima à de entrada. A Fig. 11 mostra o esquemático com os transistores parametrizados.

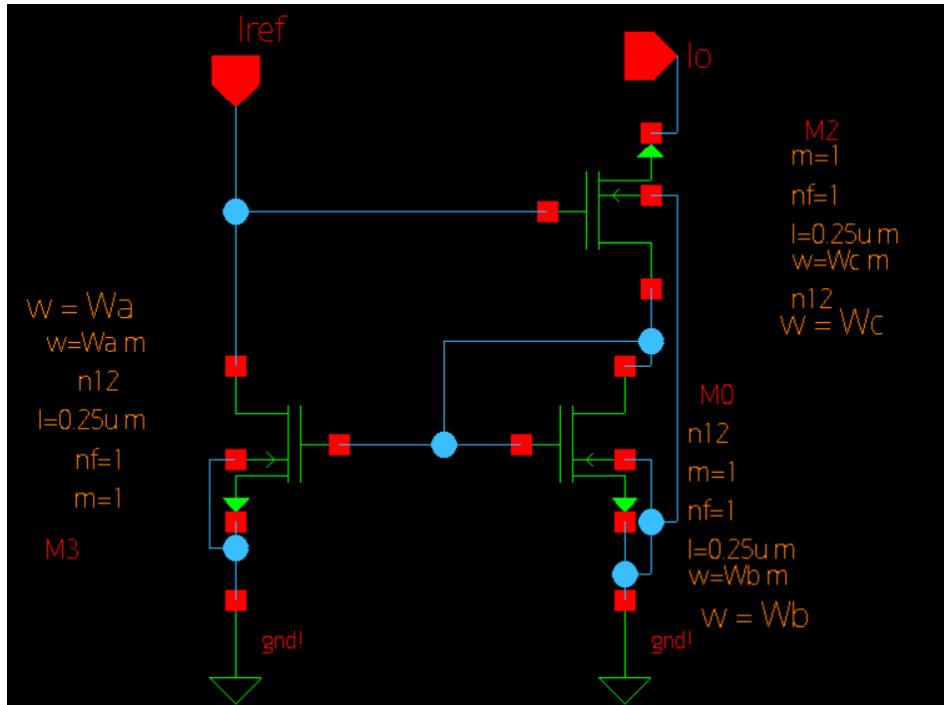


Fig. 11 – Esquemático do Espelho de Wilson NMOS com variação de W
Fonte: Os autores

Inicialmente foram fixados $W_a = W_b = 2 \mu\text{m}$ e W_c foi variado. O intervalo de variação foi colocado no cenário mais assertivo do Espelho Simples, mas ao simular notou-se: em 0,6 V (que corresponde a $Vdd/2$ em V_{out}) todas as curvas apresentam o mesmo valor de corrente (23,8 μA), que está bem aquém do erro permitido, como mostra a Fig. 12. Assim, foram feitas novas variações a fim de buscar um valor plausível. A legenda no eixo y “ $i/V_6/MINUS$ ” representa a corrente de saída (A).

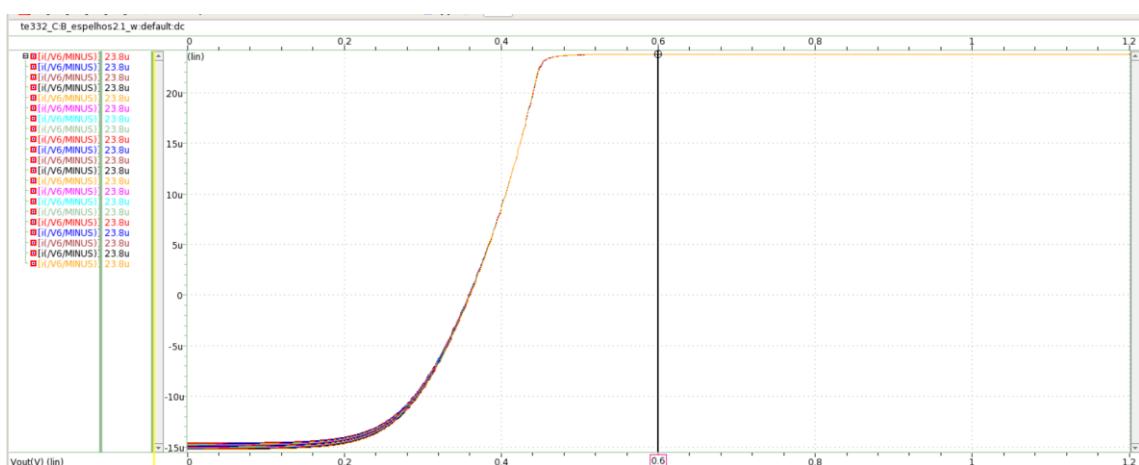


Fig. 12 – Primeira simulação do Espelho de Wilson NMOS com variação de W
Fonte: Os autores

Depois de alguns testes, um resultado interessante a que se chegou (com $24,9 \mu\text{A}$ na corrente de saída) foi com $Wa = 0,87 \mu\text{m}$, $Wb = 0,9 \mu\text{m}$ e $Wc = 10 \mu\text{m}$, como mostra a Fig. 13. Como os dois primeiros transistores estavam em valores bem baixos e o terceiro estava alto, foram feitas novas simulações, limitando a variação de Wc . As correntes de saída no esquemático são dadas por “ Io ”, enquanto nos gráficos denominamos de “ I_{Out} ”.

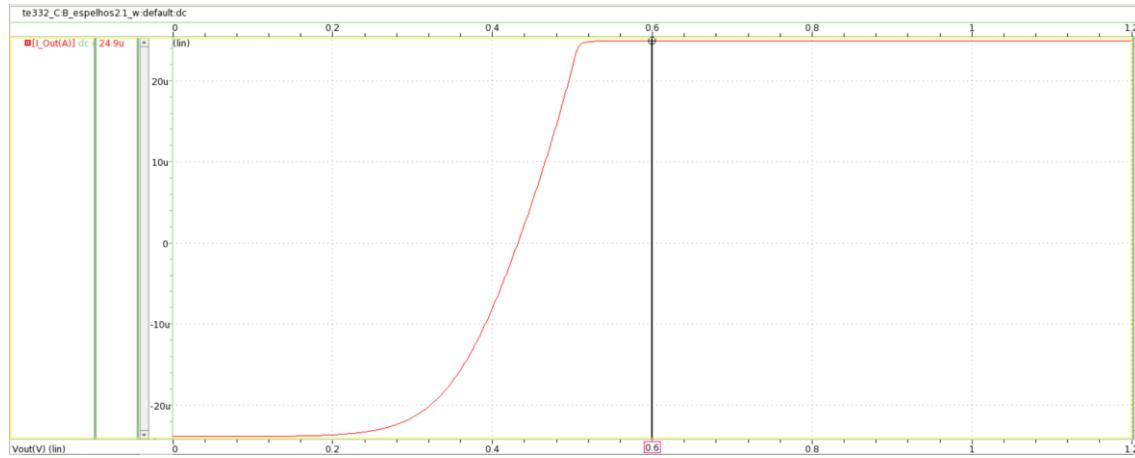


Fig. 13 – Segunda simulação do Espelho de Wilson NMOS com variação de W
Fonte: Os autores

Assim, foi feita uma tentativa de deixar a largura dos transistores mais próximas umas das outras. Uma tentativa foi feita com $Wa = 1 \mu\text{m}$, $Wb = 1,5 \mu\text{m}$ e $Wc = 5 \mu\text{m}$, obtendo uma corrente de saída de $36,1 \mu\text{A}$ em $Vout = 0,6 \text{ V}$, como mostra a Fig. 14.

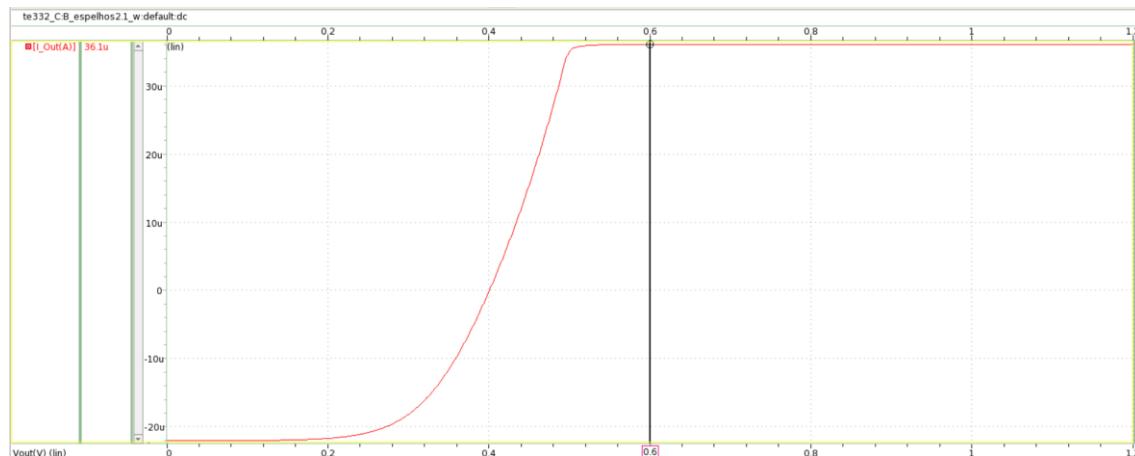


Fig. 14 – Terceira simulação do Espelho de Wilson NMOS com variação de W
Fonte: Os autores

Mais uma tentativa pode ser vista na Fig. 15, com $Wa = 0,95 \mu\text{m}$, $Wb = 1 \mu\text{m}$ e $Wc = 5 \mu\text{m}$, obtendo uma corrente de saída de $25,3 \mu\text{A}$ em $0,6 \text{ V}$.

Por fim, o melhor cenário obtido foi $Wa = 0,96 \mu\text{m}$, $Wb = 1 \mu\text{m}$ e $Wc = 5 \mu\text{m}$, obtendo uma corrente de saída de $25 \mu\text{A}$ em $0,6 \text{ V}$, sendo ideal. A Fig. 16 mostra os gráficos plotados na simulação, que resultou neste bom cenário. Na Fig. 16 pode-se ver que há mais valores de Wc que levam a $25 \mu\text{A}$, mas foi escolhido $Wc = 5 \mu\text{m}$ por ser o valor mais próximo da largura dos outros transistores desta simulação. A Fig. 17 mostra o Espelho de Wilson com os valores descritos.

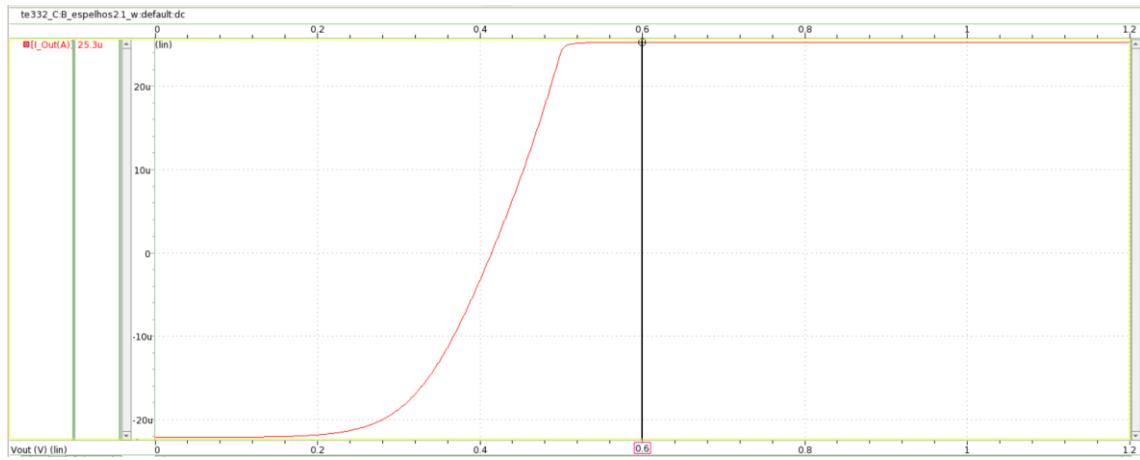


Fig. 15 – Quarta simulação do Espelho de Wilson NMOS com variação de W
 Fonte: Os autores

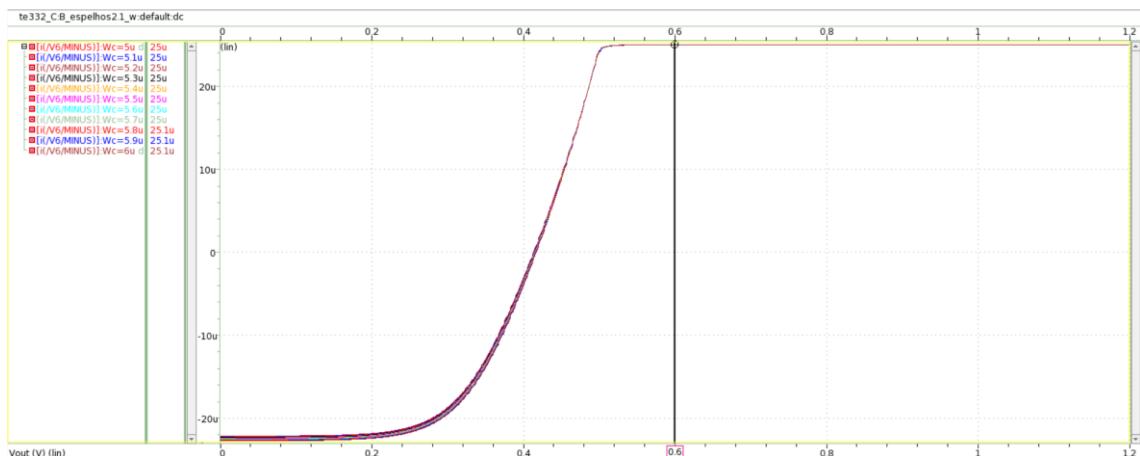


Fig. 16 – Quinta e última simulação do Espelho de Wilson NMOS com variação de W
Fonte: Os autores

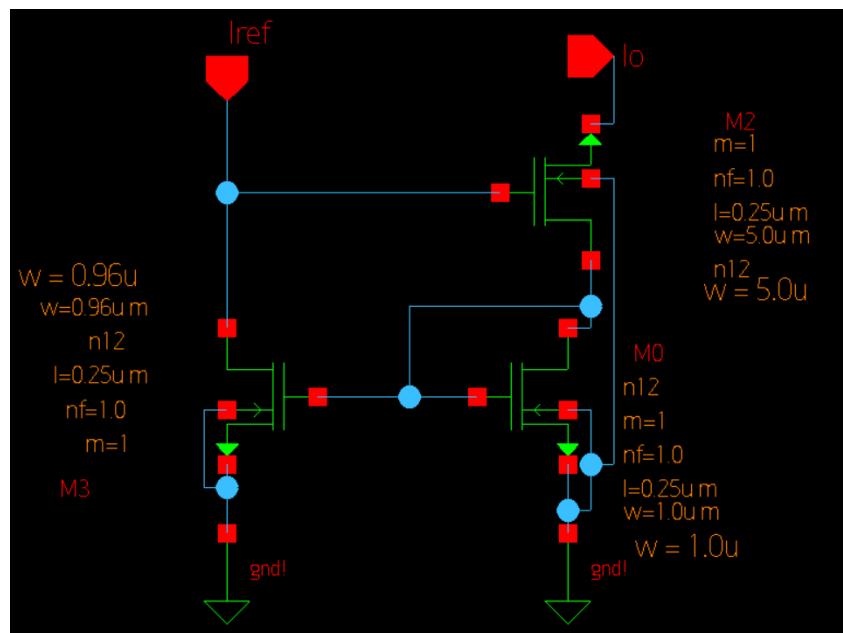


Fig. 17 – Esquemático do Espelho de Wilson NMOS com larguras definidas
Fonte: Os autores

g) Então neste último item da primeira parte é pedido para plotar as duas correntes de saída, de ambos os espelhos. A Fig. 18 mostra esse gráfico, destacando que para $V_{out} = V_{dd}/2$, ambas as correntes de saída estão em $25 \mu\text{A}$. As correntes de saída no esquemático são dadas por “ I_o ”, enquanto nos gráficos denominamos de “ I_{Out} ”.

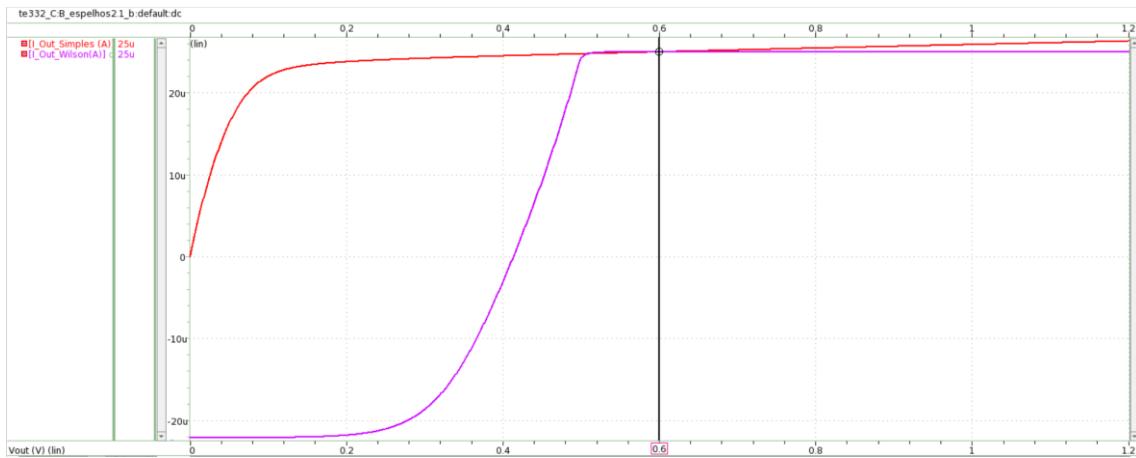


Fig. 18 – Corrente de saída em função de V_{out} após o redimensionamento
Fonte: Os autores

2.2. ESPELHOS DE CORRENTE PMOS

a) Nesta segunda etapa do relatório serão praticamente replicados os procedimentos feitos com o NMOS para o transistor PMOS. Assim, na Fig. 19 é mostrado o esquemático para o Espelho Simples com PMOS, enquanto na Fig. 20 é mostrado o símbolo construído para ele.

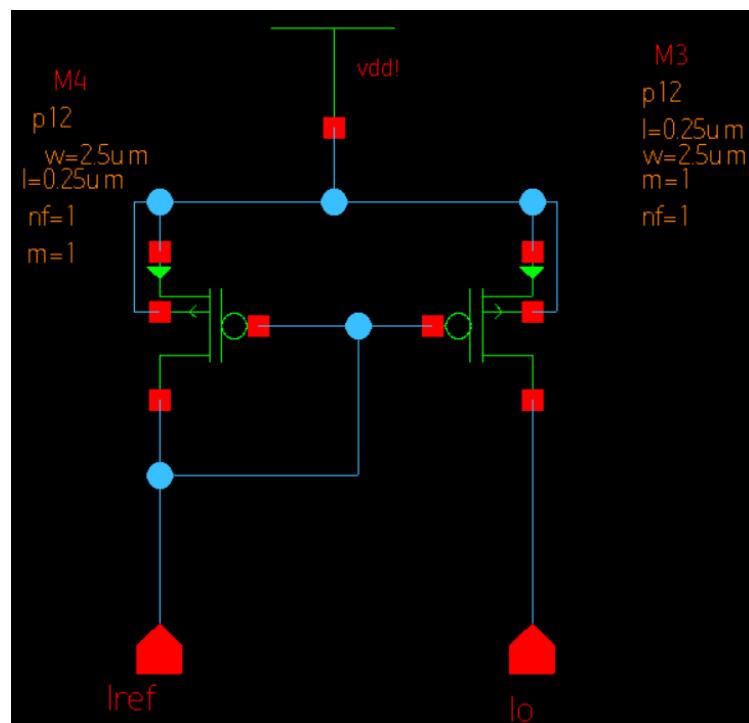


Fig. 19 – Esquemático para Espelho Simples PMOS
Fonte: Os autores

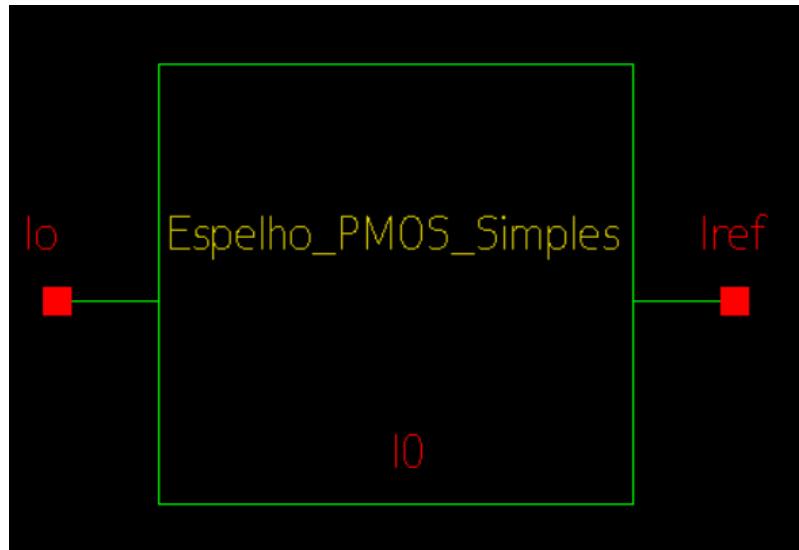


Fig. 20 – Símbolo para Espelho Simples PMOS

Fonte: Os autores

Então foi criado o esquemático para Espelho de Wilson PMOS, como mostrado na Fig. 21, enquanto seu símbolo é mostrado na Fig. 22.

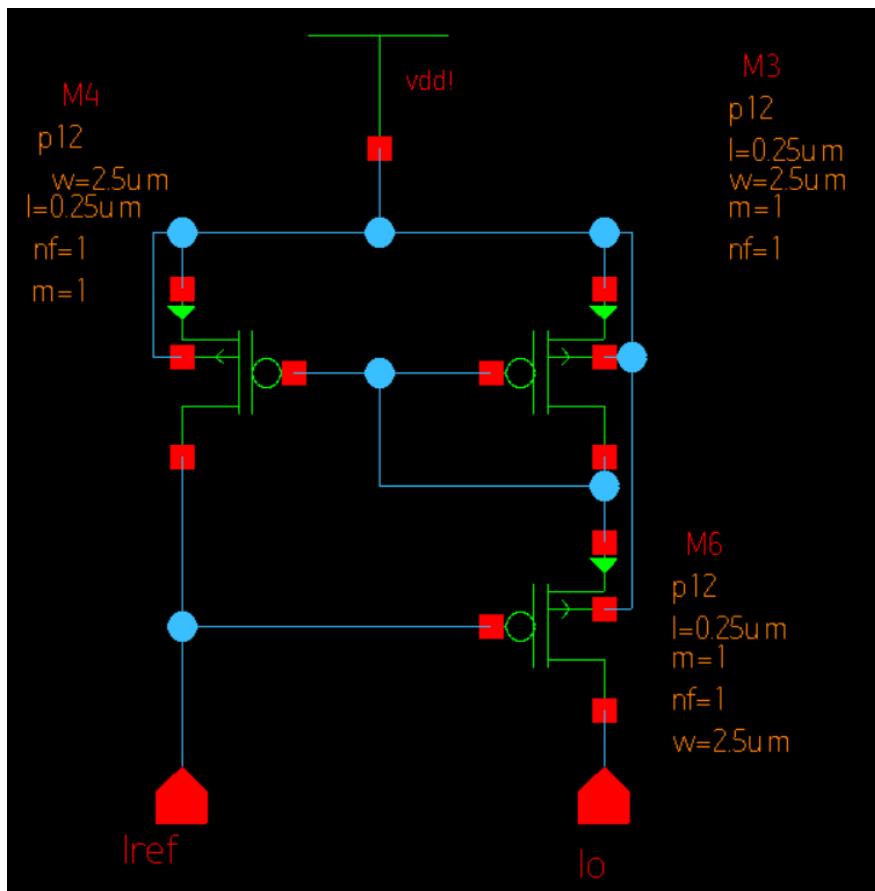


Fig. 21 – Esquemático para Espelho de Wilson PMOS

Fonte: Os autores

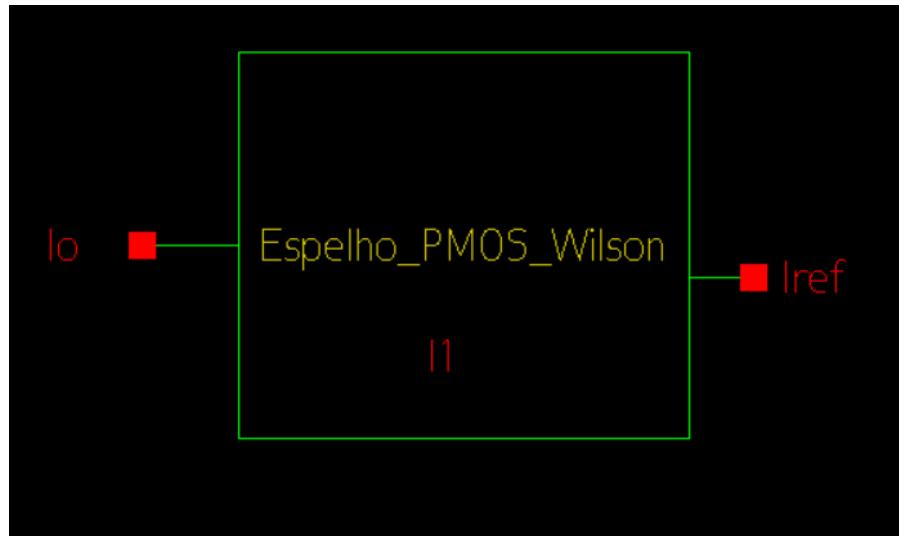


Fig. 22 – Símbolo para Espelho de Wilson PMOS
Fonte: Os autores

b) Neste item é necessário aplicar uma fonte de corrente de $25 \mu\text{A}$ na entrada de ambos os espelhos e traçar a corrente de saída em função da tensão de saída. A Fig. 23 mostra o esquemático preparado para a simulação e a Fig. 24 é o gráfico obtido ao simular. As correntes de saída no esquemático são dadas por “ Io ”, enquanto nos gráficos denominamos de “ I_{Out} ”.

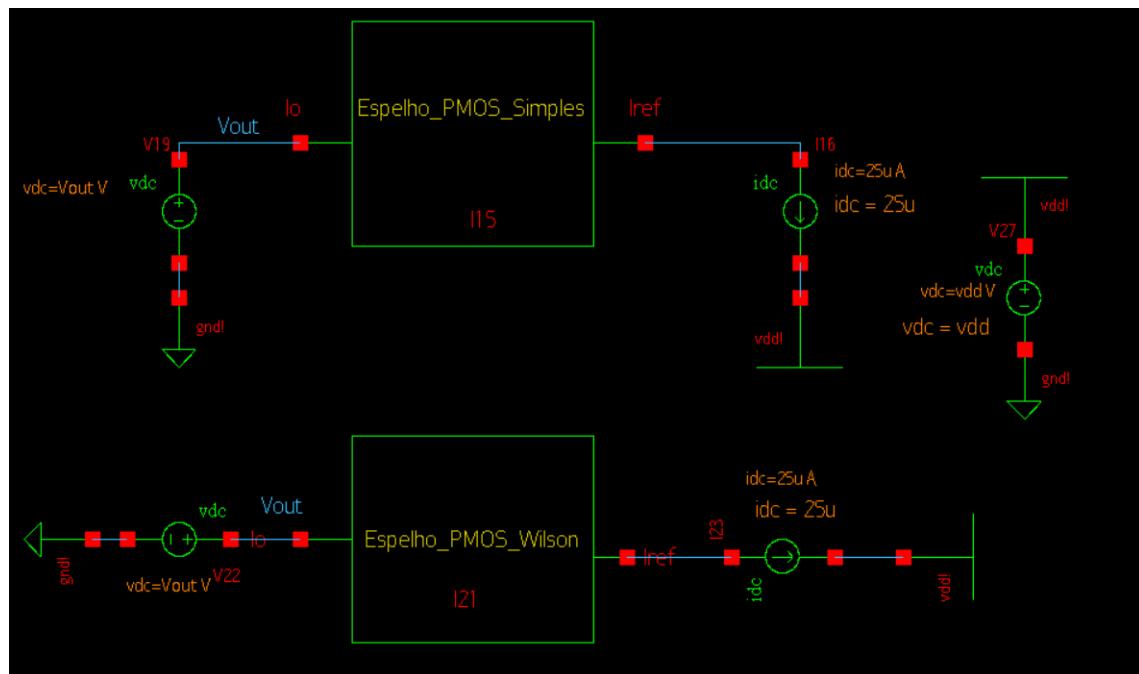


Fig. 23 – Esquemático para simulação PMOS
Fonte: Os autores

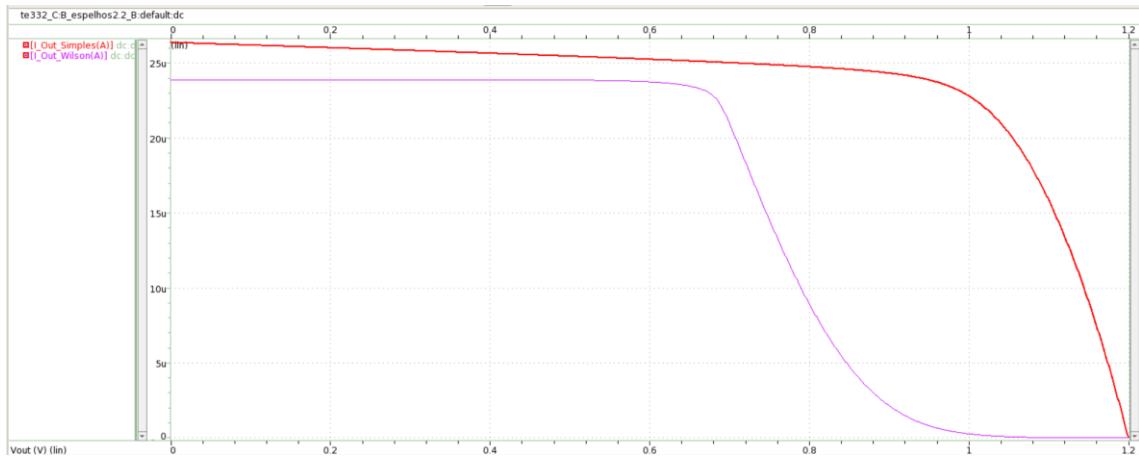


Fig. 24 – Gráfico obtido ao simular
Fonte: Os autores

c) Neste item é necessário dimensionar as larguras dos transistores para ter a corrente de saída o mais próximo possível da corrente de entrada. Para isso foi utilizado o método gráfico descrito nos itens anteriores.

Primeiramente foi feito o procedimento para o Espelho Simples PMOS. A Fig. 25 mostra o esquemático com W genéricos, Wa e Wb . Então, na simulação de teste o Wa foi mantido em $2,5 \mu\text{m}$ e Wb foi variado de $1 \mu\text{m}$ até $5 \mu\text{m}$ com variação de $0,5 \mu\text{m}$. As curvas plotadas são mostradas na Fig. 26, e nela pode-se ver que quando $Wb = 2,5 \mu\text{m}$ a corrente de saída está em $25,2 \mu\text{A}$, que é o valor mais próximo obtido. Nos gráficos, a legenda “ $i/V19/PLUS$ ” indica a corrente de saída (A).

Com isso, é fechado o intervalo ao redor de $2,5 \mu\text{m}$. A segunda simulação foi feita variando entre $2,3 \mu\text{m}$ até $2,6 \mu\text{m}$, com o passo de $0,01 \mu\text{m}$. As curvas obtidas são mostradas na Fig. 27, e nela pode-se ver que quando $Wb = 2,48 \mu\text{m}$, a corrente de saída é exatamente $25 \mu\text{A}$.

Dessa forma, na Fig. 28 é mostrado o esquemático com esses valores.

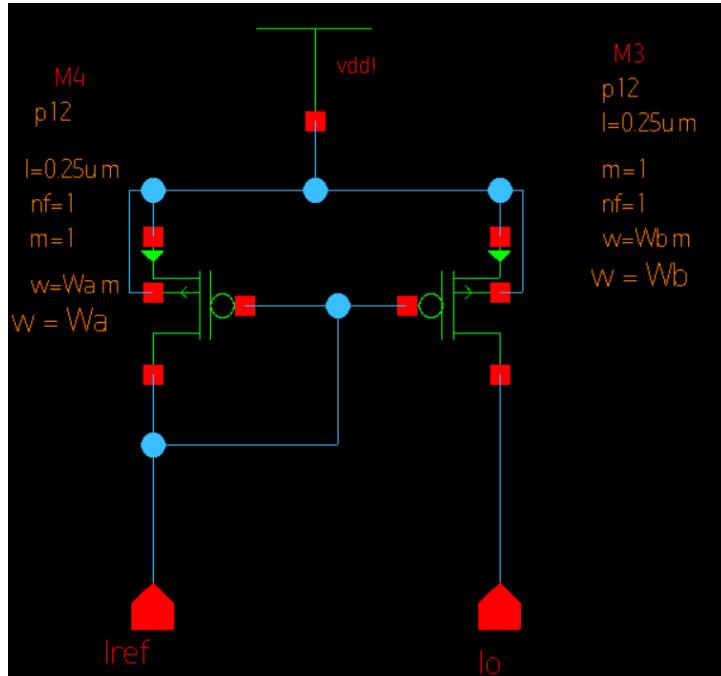


Fig. 25 – Espelho Simples PMOS com W genérico
Fonte: Os autores

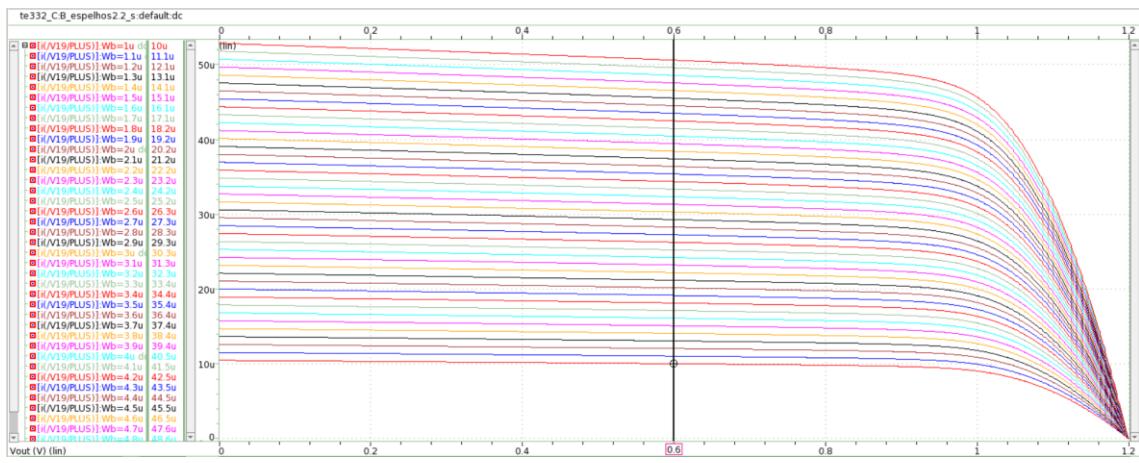


Fig. 26 – Primeira variação de W_b
Fonte: Os autores

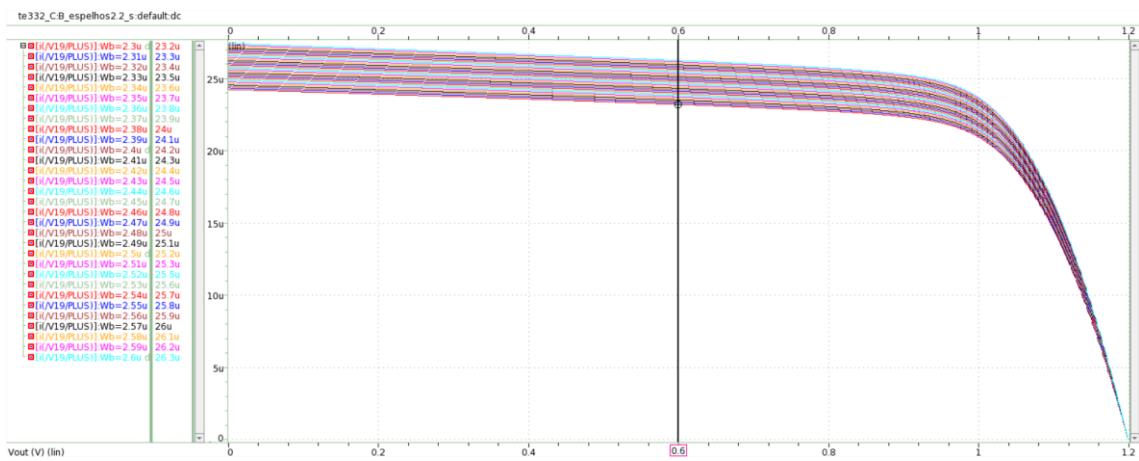


Fig. 27 – Segunda variação de W_b
Fonte: Os autores

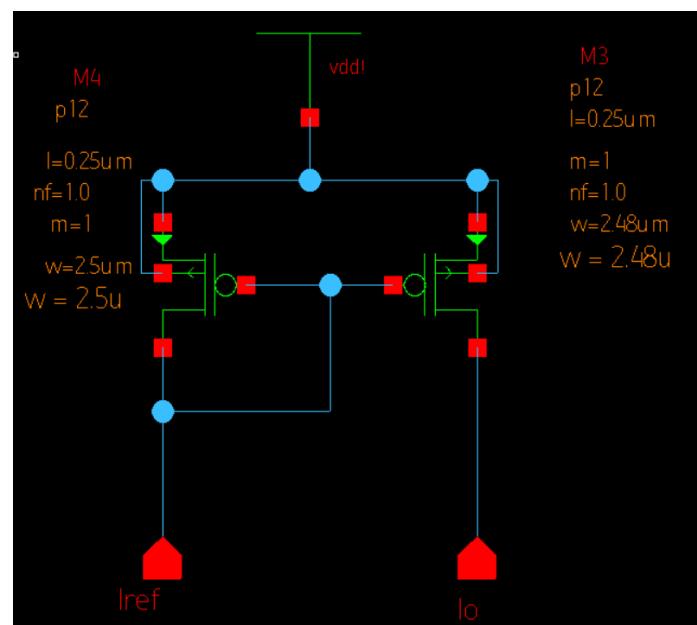


Fig. 28 – Esquemático do Espelho Simples PMOS com larguras definidas
Fonte: Os autores

Então foi realizado o mesmo procedimento para o Espelho de Wilson. A Fig. 29 mostra o esquemático com valores genéricos de W .

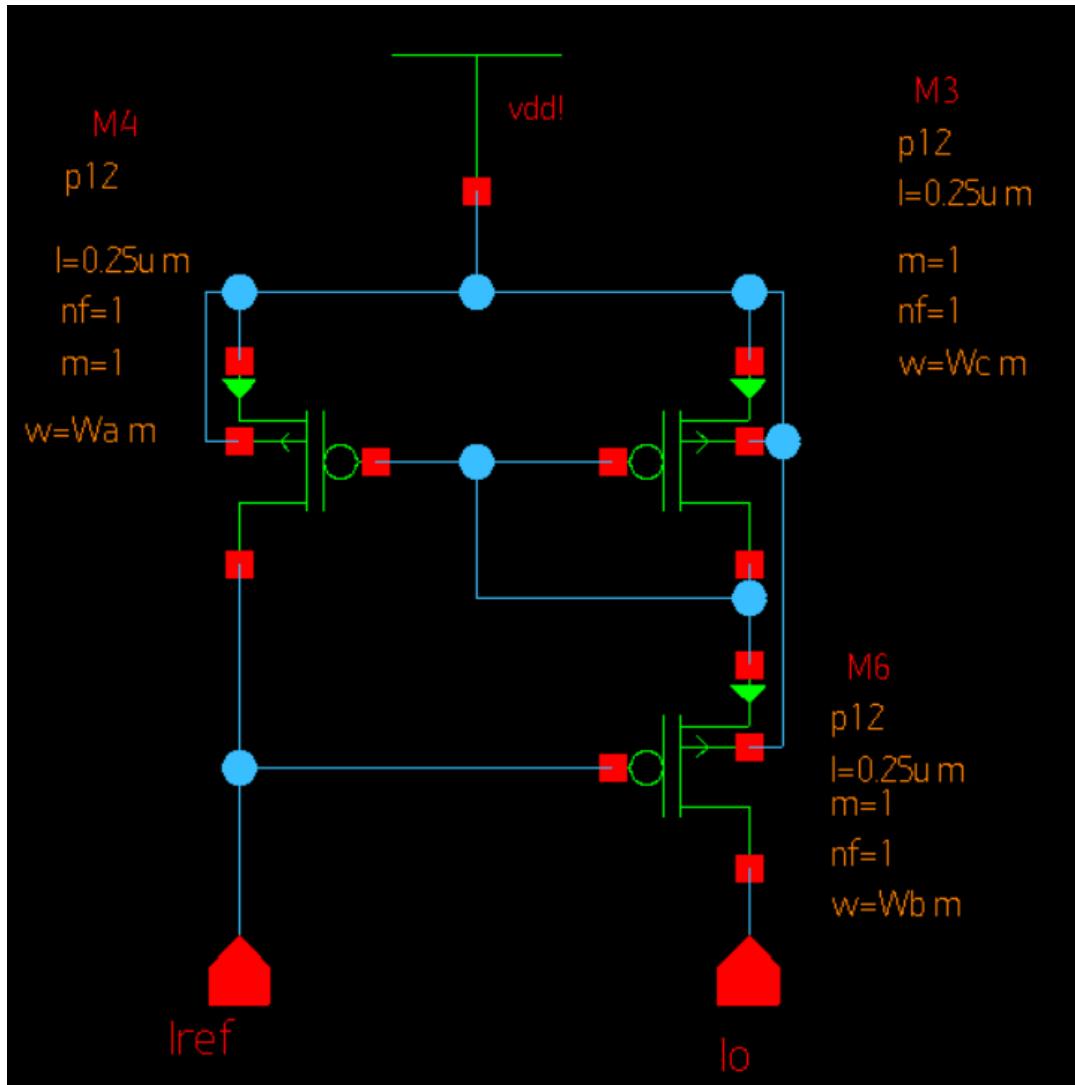


Fig. 29 – Espelho de Wilson PMOS com W genérico
Fonte: Os autores

Na primeira simulação de teste foram fixados $W_a = W_b = 2,5 \mu\text{m}$, e W_c foi variado de $1 \mu\text{m}$ até $10 \mu\text{m}$, com variação de $0,1 \mu\text{m}$. A Fig. 30 mostra os gráficos obtidos, e vê-se que os valores mais próximos ocorrem de $2,6 \mu\text{m}$ até $2,8 \mu\text{m}$, onde a corrente obtida está entre $24,7 \mu\text{A}$ e $26,6 \mu\text{A}$. Dessa forma, na seguinte simulação é explorado melhor esse intervalo. Nos gráficos, a legenda “ $i/V22/PLUS$ ” representa a corrente de saída (A).

Assim, na simulação seguinte foi configurado para W_c um intervalo de $2,6 \mu\text{m}$ até $2,8 \mu\text{m}$, variando com $0,01 \mu\text{m}$. Foram plotadas as curvas, como mostrado na Fig. 31, e nela pode-se ver que $W_c = 2,63 \mu\text{m}$ leva a uma corrente de $25 \mu\text{A}$. Com isso, a Fig. 32 mostra o esquemático com as larguras redefinidas para esses valores.

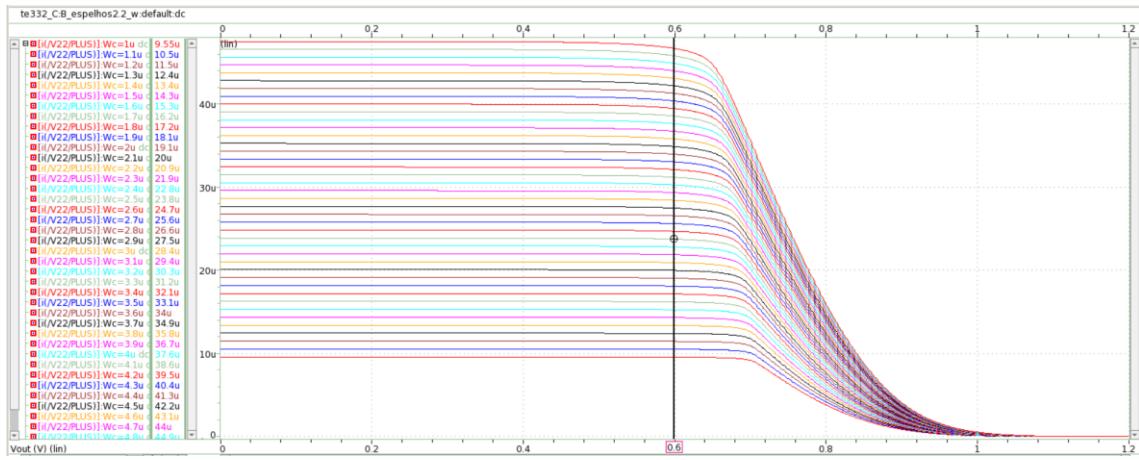


Fig. 30 – Primeira simulação com variação de W_c
Fonte: Os autores

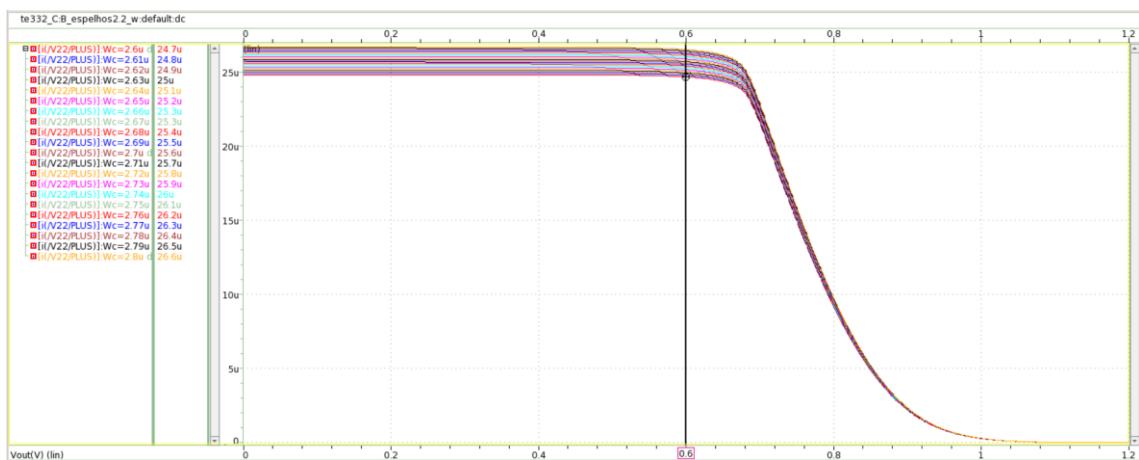


Fig. 31 – Segunda simulação com variação de W_c
Fonte: Os autores

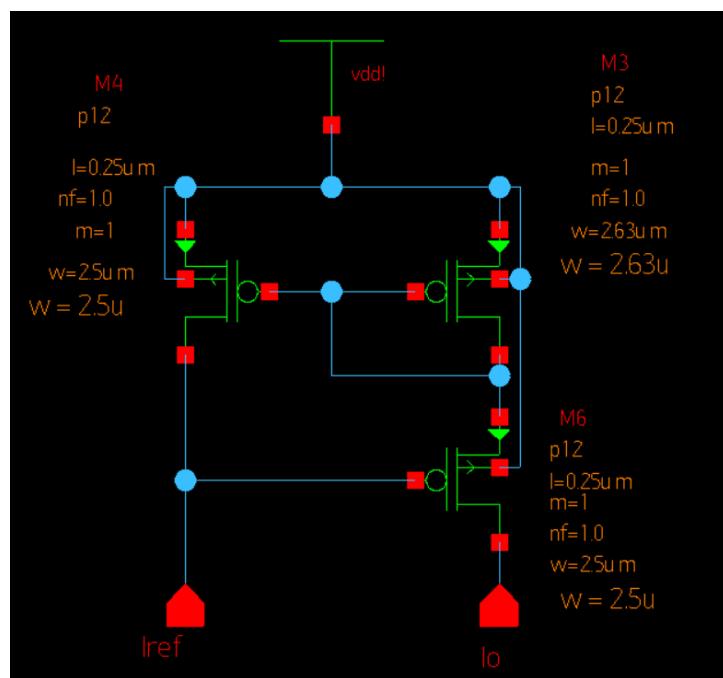


Fig. 32 – Esquemático de Espelho de Wilson PMOS com W redefinido
Fonte: Os autores

Por fim é feita a simulação com ambos os espelhos, destacando as correntes obtidas quando $V_{out} = V_{dd}/2$, como mostra a Fig. 33. Nela pode-se ver que em $V_{out} = 0,6\text{ V}$, ambas as correntes de saída são iguais à corrente de entrada, $25\text{ }\mu\text{A}$. As correntes de saída no esquemático são dadas por “ I_o ”, enquanto nos gráficos denominamos de “ I_{Out} ”.

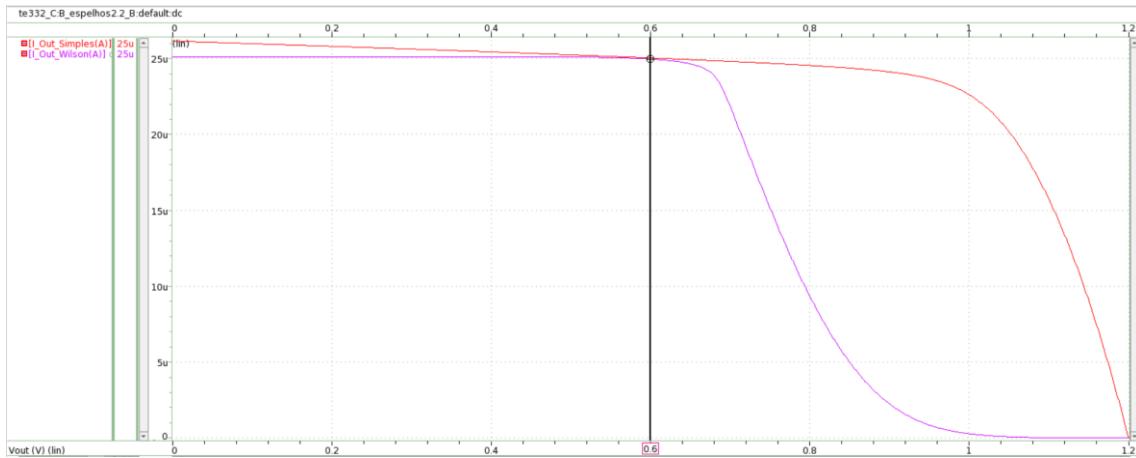


Fig. 33 – Correntes de saída em função de V_{out} após o redimensionamento para PMOS
 Fonte: Os autores

2.3. REFERÊNCIA DE CORRENTE

Primeiramente, no Espelho de Corrente Simples NMOS é colocada uma resistência ideal entre a entrada e o Vdd . Como é pedido para dimensionar a resistência a fim de obter uma corrente de 25 μA (com 0,5% de erro permitido) é configurada uma resistência genérica, R_a , a fim de realizar testes e encontrar um valor de corrente plausível. O esquemático é mostrado na Fig. 34.

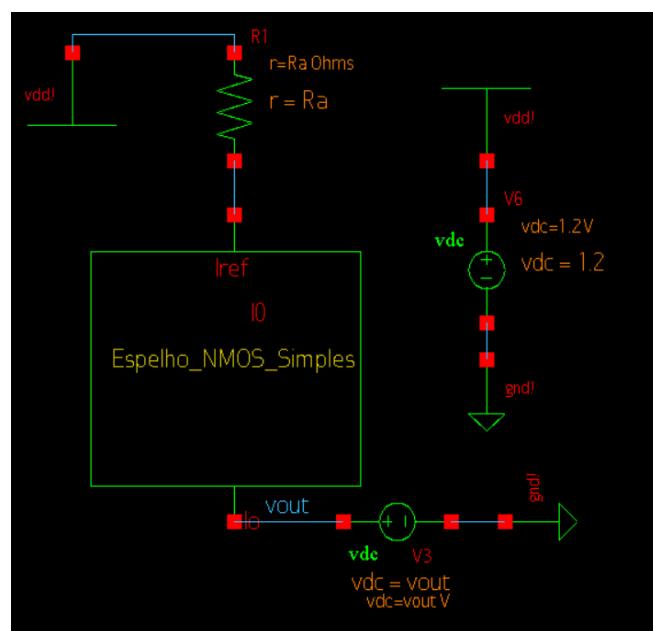


Fig. 34 – Resistência genérica para o Espelho NMOS Simples
Fonte: Os autores

Então, na primeira simulação foi configurado para R_a uma resistência de $48 \text{ k}\Omega$, uma vez que pela Lei de Ohm, a tensão (1,2 V) sobre a corrente ($25 \mu\text{A}$) resultaria nesse valor. No entanto, o que se obteve foi uma corrente de entrada (“ $i/I_0/I_{ref}$ ”) aproximadamente $16,5 \mu\text{A}$, como mostra a Fig. 35.

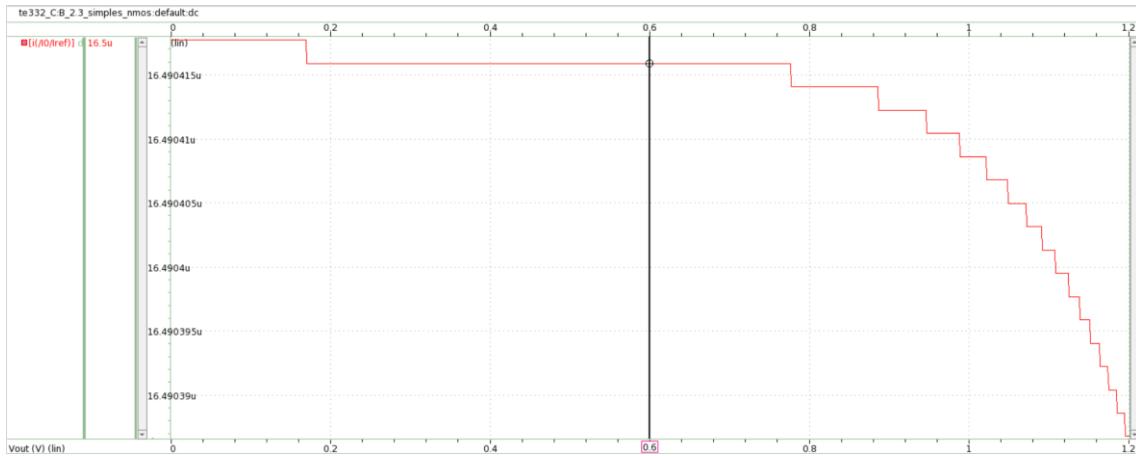


Fig. 35 – Primeira variação de resistência para o Espelho NMOS Simples
Fonte: Os autores

Posteriormente, no segundo teste, foi setada uma resistência de $24 \text{ k}\Omega$, que resultou em uma corrente de entrada de aproximadamente $31,4 \mu\text{A}$. Assim, estimou-se que o valor ideal estaria entre $24 \text{ k}\Omega$ e $48 \text{ k}\Omega$, como mostra a Fig. 36.

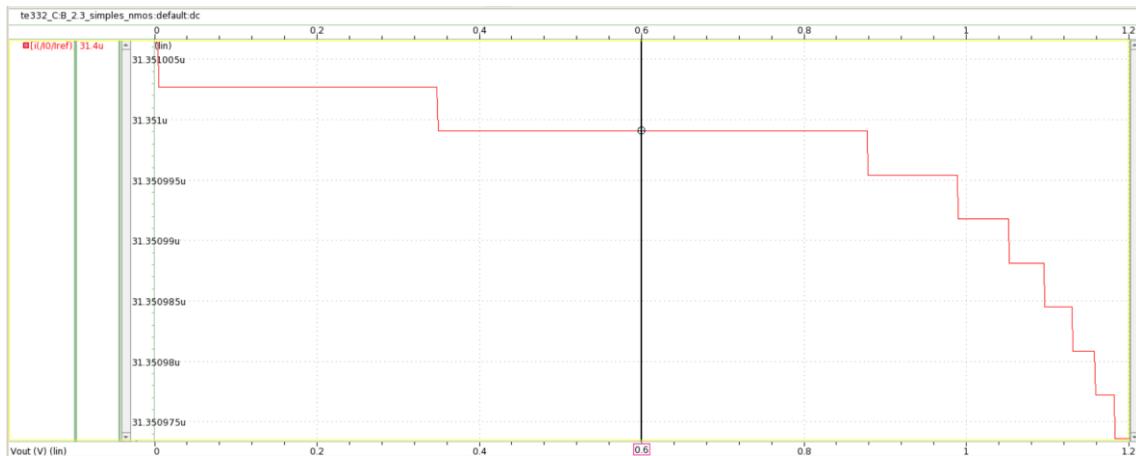


Fig. 36 – Segunda variação de resistência para o Espelho NMOS Simples
Fonte: Os autores

O terceiro teste, então, foi configurado quando a resistência admitiu $30 \text{ k}\Omega$, o que resultou em uma corrente de cerca de $25,5 \mu\text{A}$, que já bem mais próximo do esperado, como mostra a Fig. 37. Assim, foi variado com menores passos a resistência para verificar a existência de um valor mais próximo



Fig. 37 – Terceira variação de resistência para o Espelho NMOS Simples
Fonte: Os autores

Então foi colocada uma resistência de $30,5 \text{ k}\Omega$, o que resultou em $25,1 \mu\text{A}$, como mostra a Fig. 38.



Fig. 38 – Quarta variação de resistência para o Espelho NMOS Simples
Fonte: Os autores

Por fim, a resistência de $30,15 \text{ k}\Omega$ levou a $25 \mu\text{A}$ em $Vout = 0,6 \text{ V}$, como mostra a Fig. 39. A Fig. 40 mostra o esquemático com a resistência ideal definida.

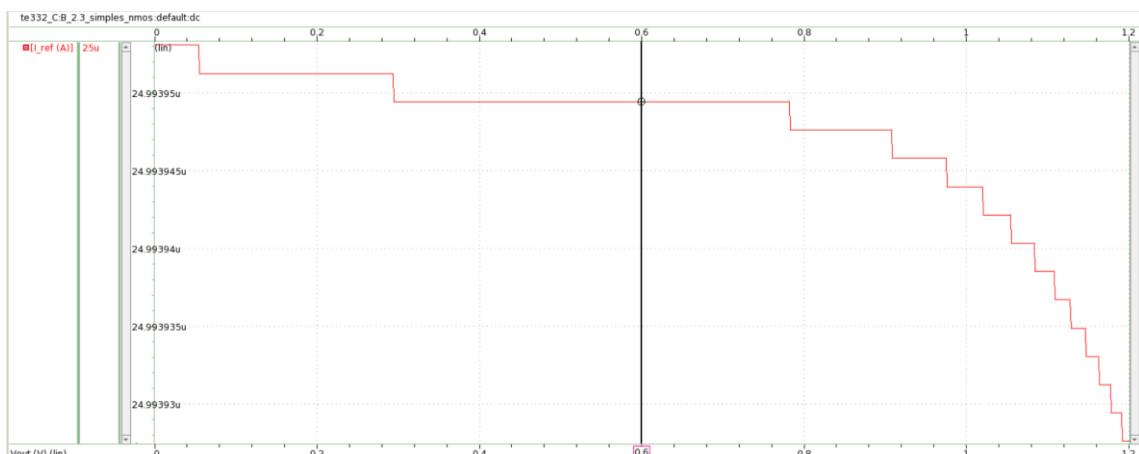


Fig. 39 – Quinta e última variação de resistência para o Espelho NMOS Simples
Fonte: Os autores

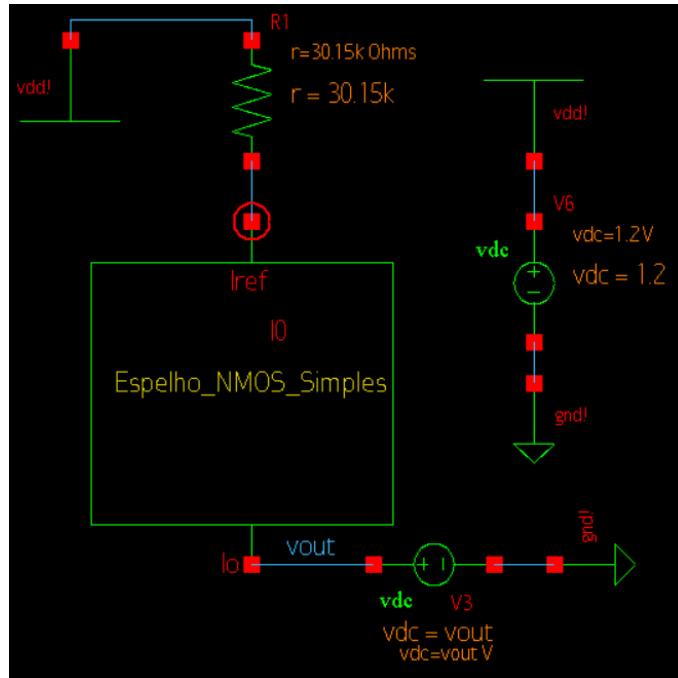


Fig. 40 – Esquemático referência de corrente Espelho Simples NMOS
Fonte: Os autores

A Fig. 41 mostra a simulação das correntes de entrada e saída em um mesmo gráfico, em função de V_{out} . É destacada a corrente quando $V_{out} = V_{dd}/2$, ou seja, 0,6 V, que mostra que ambas estão com 25 μ A.

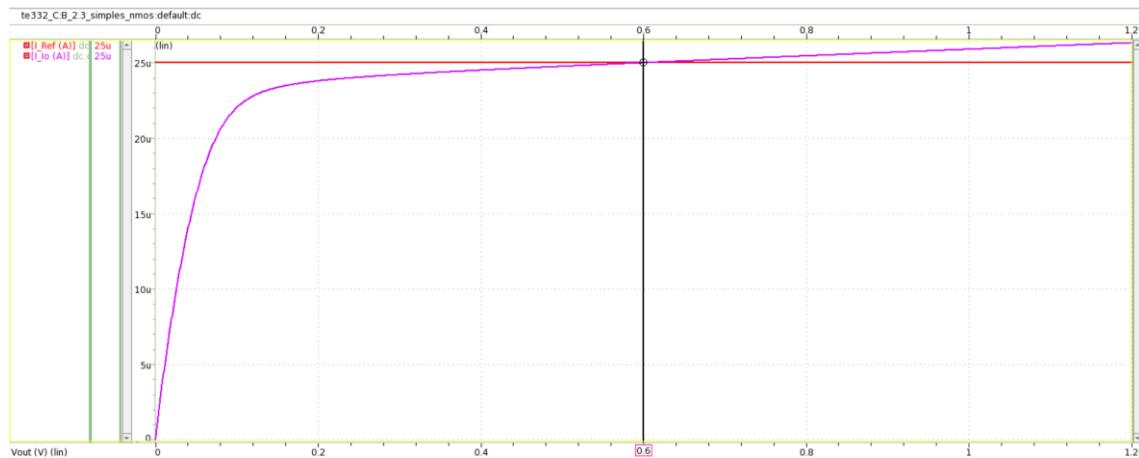


Fig. 41 – Correntes de entrada e saída em função de V_{out} para o Espelho Simples NMOS
Fonte: Os autores

Então o mesmo procedimento é realizado para o Espelho de Corrente de Wilson NMOS. Primeiramente é feito um esquemático, como na Fig. 42, em que há uma resistência ideal R_a na entrada do espelho.

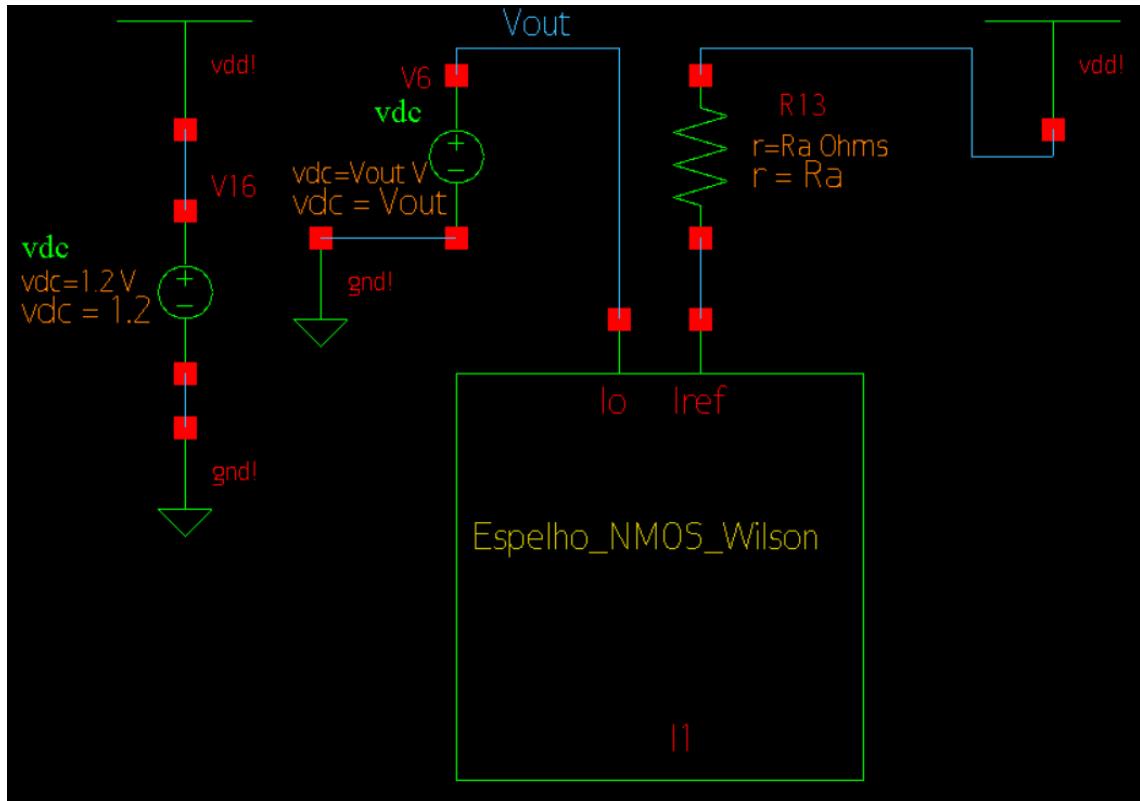


Fig. 42 – Resistência genérica para o Espelho de Wilson NMOS
Fonte: Os autores

Então, novamente o primeiro valor de resistência atribuído foi de $48 \text{ k}\Omega$, o que resultou em uma corrente de aproximadamente de $7,52 \mu\text{A}$, como mostra a Fig. 43.

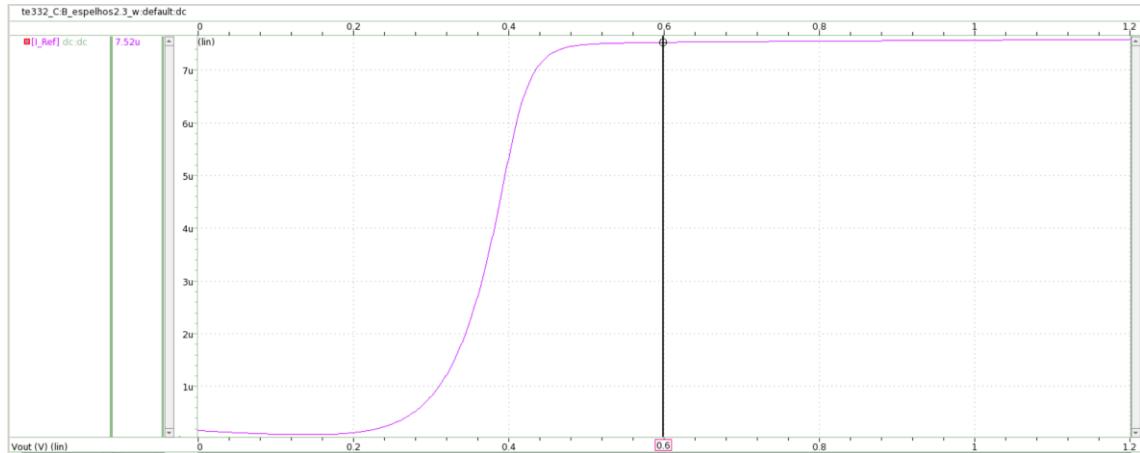


Fig. 43 – Primeira variação de resistência para o Espelho de Wilson NMOS
Fonte: Os autores

Então a resistência foi alterada para $24 \text{ k}\Omega$, o que levou a uma corrente de cerca de $12,5 \mu\text{A}$, como mostra a Fig. 44.

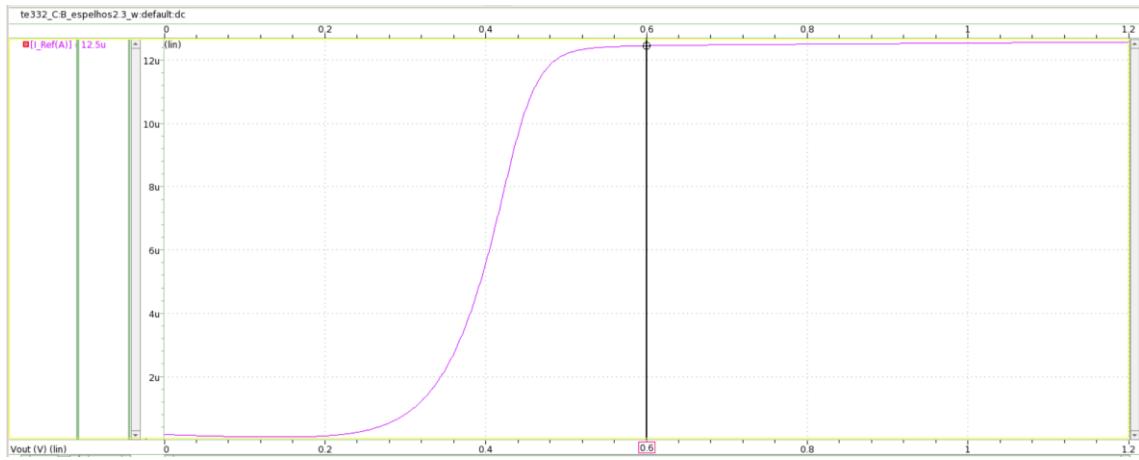


Fig. 44 – Segunda variação de resistência para o Espelho de Wilson NMOS
Fonte: Os autores

Assim, foi constatado que é necessário diminuir ainda mais a resistência para elevar a corrente. Dessa forma foi configurado um valor de $12\text{ k}\Omega$, o que levou a cerca de $19,7\text{ }\mu\text{A}$, como mostra o Fig. 45.

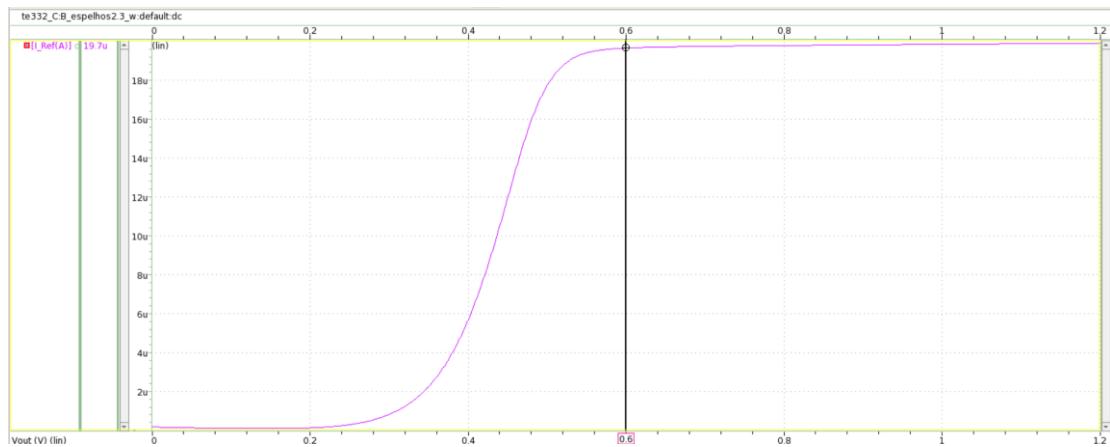


Fig. 45 – Terceira variação de resistência para o Espelho de Wilson NMOS
Fonte: Os autores

No prosseguimento do teste, a resistência foi reduzida para $6\text{ k}\Omega$, o que resultou em corrente de $28,9\text{ }\mu\text{A}$, como mostra a Fig. 46.

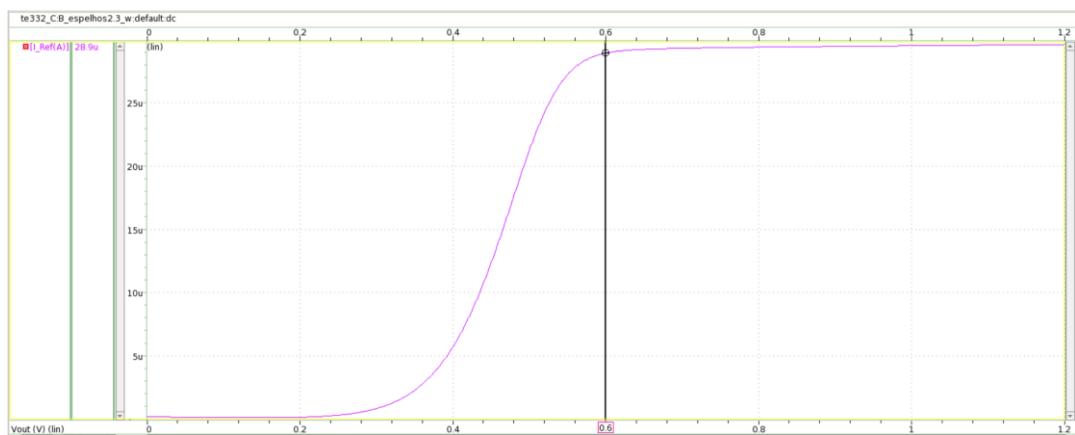


Fig. 46 – Quarta variação de resistência para o Espelho de Wilson NMOS
Fonte: Os autores

Com isso, constatou-se que a resistência ideal se encontra entre $6\text{ k}\Omega$ e $12\text{ k}\Omega$. A resistência de $8\text{ k}\Omega$ levou a uma corrente de $24,9\text{ }\mu\text{A}$, que é bem próxima do esperado, como mostra a Fig. 47.

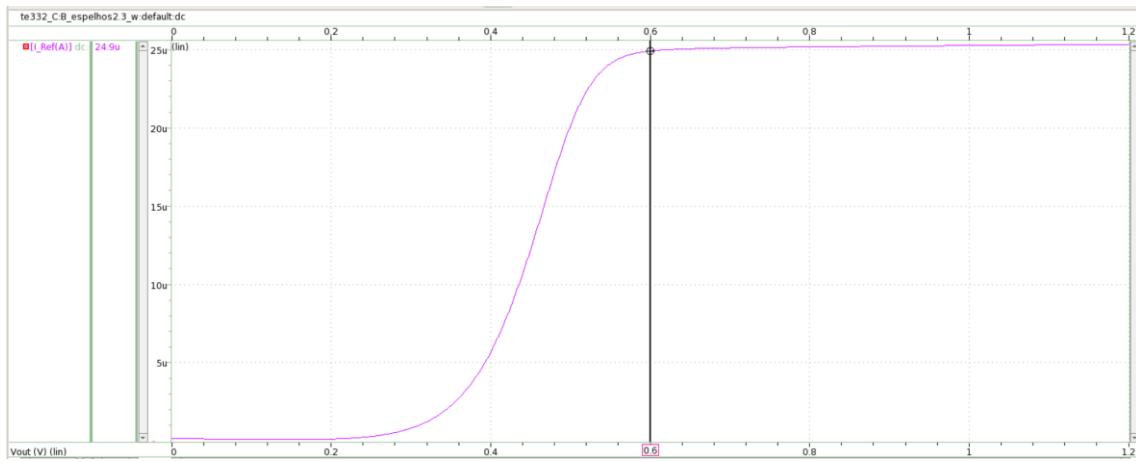


Fig. 47 – Quinta variação de resistência para o Espelho de Wilson NMOS
Fonte: Os autores

Ao diminuir para $7,5\text{ k}\Omega$, chegou-se a $25,8\text{ }\mu\text{A}$, como mostra a Fig. 48.

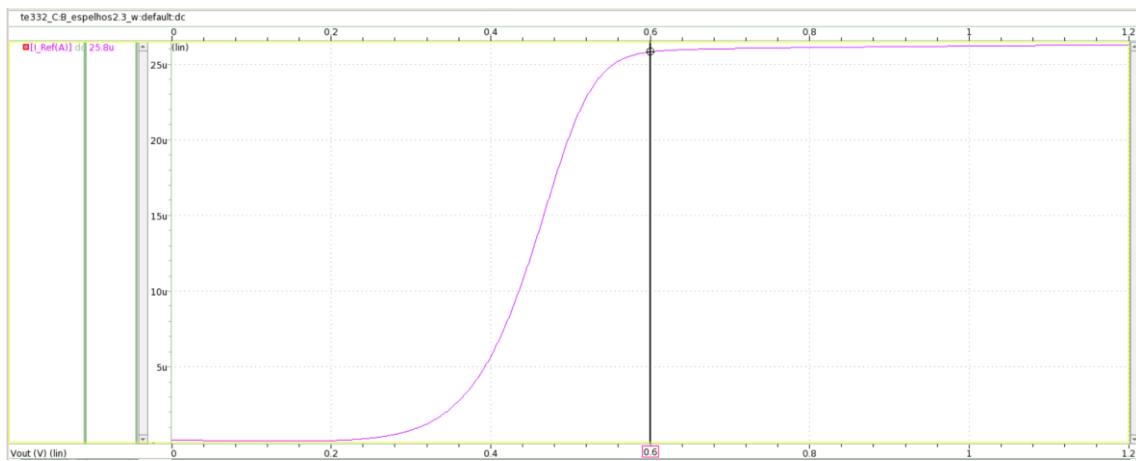


Fig. 48 – Sexta variação de resistência para o Espelho de Wilson NMOS
Fonte: Os autores

A resistência de $7,8\text{ k}\Omega$, por sua vez, levou a $25,3\text{ }\mu\text{A}$, como mostra a Fig. 49.

E finalmente $7,95\text{ k}\Omega$ levou a $25\text{ }\mu\text{A}$, como mostra a Fig. 50. O esquemático com a resistência é mostrado na Fig. 51.

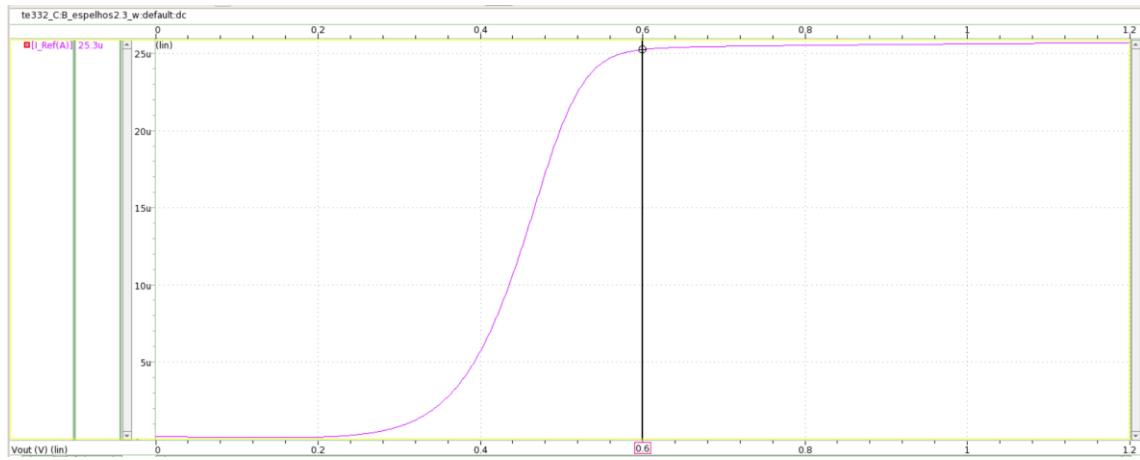


Fig. 49 – Sétima variação de resistência para o Espelho de Wilson NMOS
Fonte: Os autores

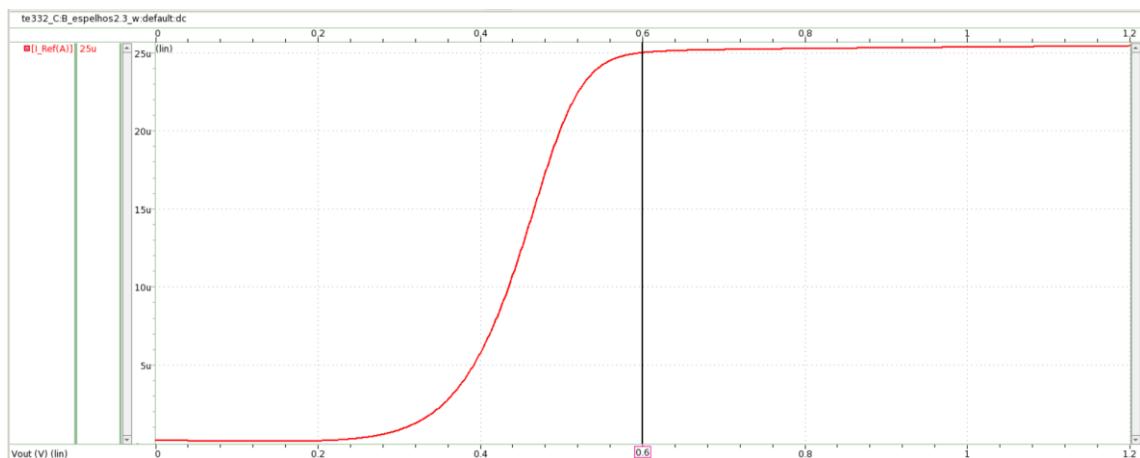


Fig. 50 – Oitava e última variação de resistência para o Espelho de Wilson NMOS
Fonte: Os autores

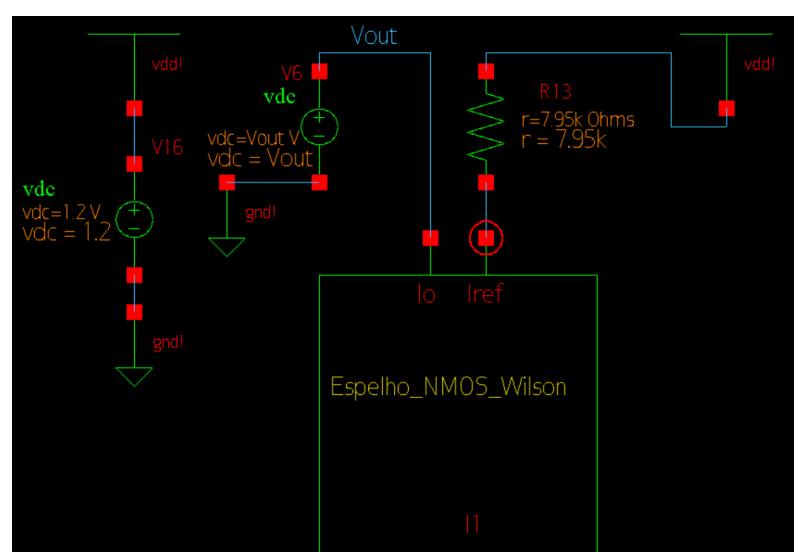


Fig. 51 – Esquemático referência de corrente Espelho de Wilson NMOS
Fonte: Os autores

Por fim são simuladas as correntes de entrada e saída com este esquemático, como mostrado na Fig. 52. É destacada a corrente em $V_{out} = V_{dd}/2$, ou seja, $V_{out} = 0,6$ V. Neste ponto, ambas as correntes estão em $25 \mu A$. As curvas são bem semelhantes, como pode-se notar na imagem.

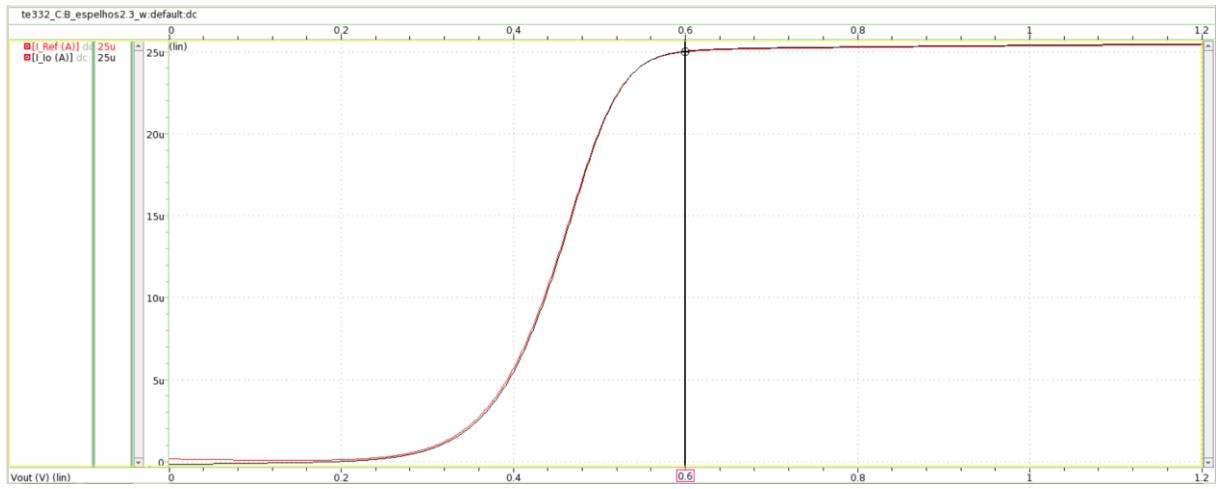


Fig. 52 – Correntes de entrada e saída em função de V_{out} com Espelho de Wilson NMOS

Fonte: Os autores