

Análise de polarização de um amplificador de potência cascode CMOS com foco em performance para dispositivos móveis

Bernardo Paixão Correa, Bernardo Leite
Universidade Federal do Paraná - GICS, Curitiba, Brasil
bernardo.correa@ufpr.br leite@ufpr.br

Resumo — Neste trabalho é analisada a polarização de um amplificador de potência de tecnologia CMOS 130 nm e topologia cascode para radiofrequência. Para dispositivos móveis, analisa-se seu desempenho em linearidade, eficiência e ganho. Foram investigadas configurações de polarização para V_{fpol} variando de 0,6 V a 1,3 V e V_{ppol} de 2,5 V a 2,9 V. Utilizando simulações de equilíbrio harmônico, loadpull, ponto de compressão e varredura de potência de entrada, encontrou-se pontos de compressão de 1 dB (OCP1dB) superiores a 15 dBm, ganho maior que 10 dB e configurações que maximizam a eficiência de potência adicionada (PAE). Entre os melhores resultados, obteve-se OCP1dB de 18,3 dBm, PAE máxima de 27,9% e ganho de 13,5 dB na configuração $V_{fpol} = 1,0$ V e $V_{ppol} = 2,9$ V.

I. INTRODUÇÃO

Com o avanço de dispositivos de comunicação móveis na sociedade, e com o crescente número desses dispositivos a conectividade sem fio torna-se cada vez mais central no cotidiano. Com essa demanda, transmissores de rádio frequência são cada vez mais fundamentais, e por sua vez, os amplificadores de potência de radiofrequência (PAs RF) são intrínsecos a esses componentes. Nos PAs ocorre a amplificação de sinais que serão transmitidos para variadas distâncias e receptores. Desse modo, com o aumento da demanda por PAs, componentes de maior consumo energético dentro de transmissores de RF [1], o desenvolvimento desses componentes torne-se imperativo, tornando-os confiáveis e mais eficientes. Com esse contexto, utilizou-se um PA com topologia cascode, amplamente adotada por proporcionar alto ganho e alta impedância de saída para usos de alta frequência [2]. Nesse estudo são analisadas as diferentes métricas que melhor podem descrever o comportamento de um PA, especialmente a linearidade, eficiência e ganho, através de uma varredura de diferentes configurações de polarização. Os valores analisados são especificamente uma análise mais minuciosa dos melhores resultados encontrados em [3] e [4] através de um método de avaliação do comportamento do PA principalmente no ponto de compressão de 1 dB. Utilizando-se de simulações de equilíbrio harmônico é possibilitada essa

análise minuciosa de seu comportamento em uma gama de configurações de polarização.

II. CIRCUITO E MÉTRICAS

Adaptando-se o PA de [2] e [5], obteve-se um PA de topologia cascode baseado em tecnologia CMOS de 130 nm. O cascode possui dois transistores, sendo o inferior um fonte comum (FC) e o principal responsável pelo alto ganho, e o superior um porta comum (PC), responsável principalmente pela alta impedância de saída, promovendo maior eficiência principalmente por minimizar o efeito de Miller [6]. A versão utilizada nesse trabalho é a mesma que em [4], onde usam-se fontes independentes para a polarização de cada transistor, denominadas V_{ppol} para a tensão de polarização do PC e V_{fpol} para a fonte comum. A carga está conectada através de um casamento de impedâncias LC, com um indutor de 1,67 nH e um capacitor de 13,8 pF. A Fig. 1. Apresenta o PA descrito.

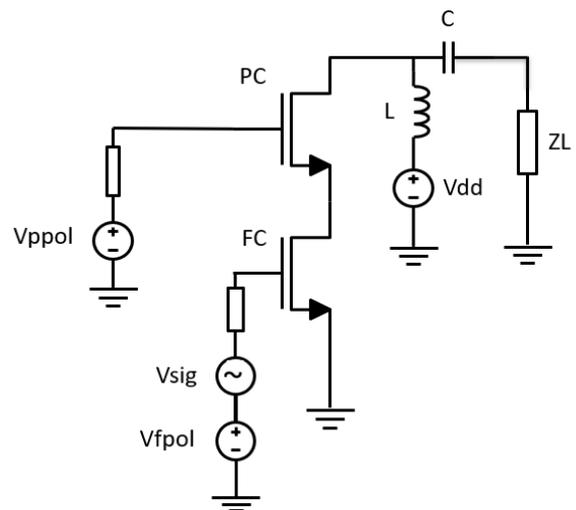


Fig. 1. Amplificador de potência com topologia cascode

Com o objetivo de descrever o comportamento do PA, uma série de métricas foi escolhida. Os três principais pontos

de interesse nesse estudo são linearidade, eficiência e ganho. Para avaliar a linearidade, o Ponto de Compressão em 1dB (OCP1dB) foi utilizado, essa métrica refere-se ao ponto em que o ganho máximo do PA sofre 1 dB de atenuação e deixa a zona de linearidade, provocando distorções caso usado após esse ponto. Avaliando a eficiência, a Eficiência de Potência Adicionada (PAE) é utilizada. Descrita pela equação:

$$PAE = \frac{P_{in} - P_{out}}{P_{dc}}, \quad (1)$$

essa métrica se baseia na razão entre a diferença da Potência de Entrada (Pin), Potência de saída (Pout) e a Potência DC adicionada ao circuito. Por fim, a terceira métrica principal é o Ganho do PA, este sendo a razão direta entre Pout e Pin, demonstrando o quanto o sinal de entrada é amplificado. Como métricas de avaliação para todo o espectro de Pin, a Potência de Saturação (Psat), valor máximo de Pout em que o PA conseguiu atingir, e PAEmax, máximo valor de PAE atingido pelo PA, também foram avaliados.

III. ANÁLISES E MÉTODOS

Para realizar todo o processo de criação do circuito e realização das simulações, o software Cadence Spectre RF foi utilizado. O método de análise consiste em uma série de 3 simulações de equilíbrio harmônico para cada uma das configurações de polarização. Inicia-se com uma simulação loadpull a fim de encontrar a impedância da carga (Z_L) no valor mais alto de OCP1dB. Z_L é então substituído na carga e uma simulação de ponto de compressão é realizada. Nesse momento, obtém-se a PAE e o Ganho no OCP1dB. Por fim, uma simulação de varredura de Pin também é executada, sendo possível adquirir as curvas de PAE e Pout do funcionamento do PA para todo o espectro de Pin avaliado, de -25 dBm a 30dBm. O processo então é repetido para cada configuração de tensão.

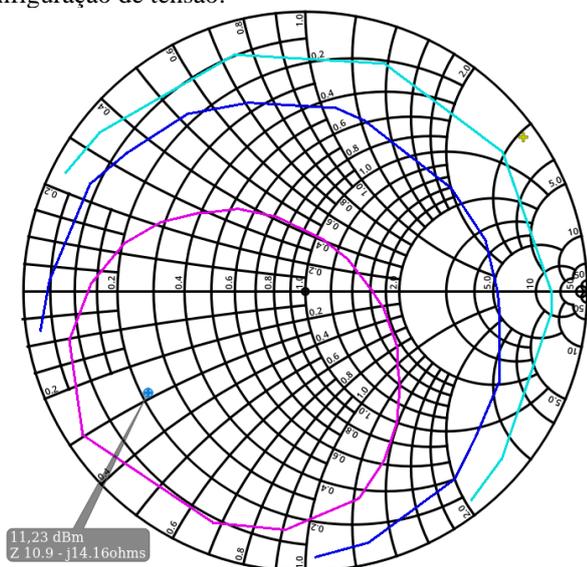


Fig. 2. Carta de smith: $V_{fpol} = 0,7$ V, $V_{ppol} = 2,5$ V, $OCP1dB = 11,23$ dBm e $Z_L = 10,9 - j14,16 \Omega$.

A. Loadpull

Inicia-se o processo com $Z_L = 50 \Omega$, a simulação loadpull é então executada e gera uma carta de Smith com os contornos

de OCP1dB para diferentes Z_L . Dos pontos gerados, o de interesse para esse trabalho é o maior OCP1dB. Após adquirido o maior valor de OCP1dB, a Z_L observada nesse ponto é colocada na carga do PA. A Fig. 2. mostra uma carta de Smith com os contornos de linearidade, o ponto de maior OCP1dB e sua Z_L correspondente para $V_{fpol} = 0,7$ V e $V_{ppol} = 2,5$ V.

B. Ponto de Compressão

Continuando o método, com a nova Z_L na carga, uma simulação de ponto de compressão é executada, fornecendo os valores de ganho e PAE diretamente para o ponto de compressão adquirido com a loadpull. Tabela I mostra os valores adquiridos nessa simulação para $V_{fpol} = 0,7$ V e $V_{ppol} = 2,5$ V.

TABELA 2. RESULTADOS PONTO DE COMPRESSÃO

Métricas	Valores
OCP1dB (dBm)	11,23
PAE (%)	6,18
Ganho (dB)	19,38

C. Varredura de Pin

Por fim, uma simulação de varredura da potência de entrada é realizada. Adquirem-se então as curvas de PAE e Pout do PA, onde é possível extrair os pontos de máximo de ambas as curvas, PAEmax e Psat. Fig. 3. Apresenta ambas as curvas e seus pontos de máximo.

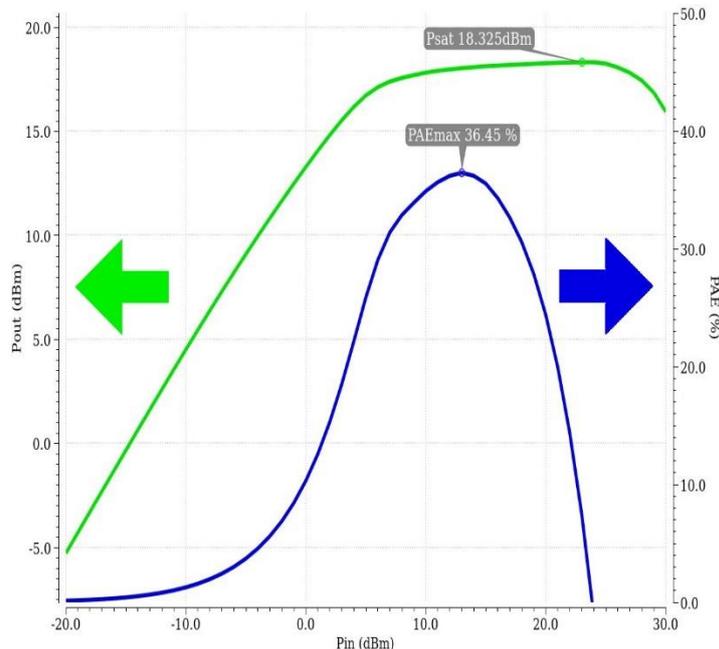


Fig. 3. PAE (%) em Azul e Pout (dBm) em verde x Pin (dBm) para $V_{fpol} = 0,7$ V, $V_{ppol} = 2,5$ V e $Z_L = 10,9 - j14,16 \Omega$.

Baseando-se nos resultados encontrados em [4], foram utilizados os valores de melhor desempenho como base para a continuação da otimização. Os principais valores encontrados para V_{fpol} foram 0,6 V e 1,1 V, enquanto para

V_{ppol} foram 2,5 V e 2,9 V. A fim de aprofundar a verificação do comportamento, os valores intermediários também foram utilizados para ambas as tensões de polarização, com um passo de 0,1 V, desse modo foi possível avaliar o intervalo de V_{fpol} de 0,6 V a 1,1 V variando também V_{ppol} de 2,5 V a 2,9 V.

IV. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O método de avaliação acima foi replicado para os intervalos de interesse, sendo V_{fpol} de 0,6 V a 1,3 V e V_{ppol} de 2,5 V a 2,9 V. Esses valores foram escolhidos usando de base os resultados [3] e [4], onde esses intervalos apresentaram os melhores valores para linearidade, eficiência e ganho. Os intervalos com maiores equilíbrios entre as 3 métricas foram

com V_{fpol} = 0,6 V e V_{ppol} com 2,5 V, 2,7 V e 2,9 V. A fim de melhorar o funcionamento, outros valores intermediários de tensão foram adicionados a essa análise para ambas as fontes. V_{fpol} varia de 0,6 V a 1,3 V e V_{ppol} de 2,5 V a 2,9 V, ambos com passo de 0,1 V. A fim de garantir resultados mais concisos e úteis para a aplicação desse PA como parte de um transmissor para dispositivos móveis, foram impostos requisitos mínimos nesse trabalho, foram definidos como OCP1dB = 15 dBm e Ganho = 10 dB, desse modo, configurações de tensão que apresentaram valores inferiores em uma ou ambas métricas foram descartados. A Tabela I foi gerada a partir desses resultados acima dos requisitos mínimos e apresenta os valores mais interessantes obtidos.

TABELA I. TABELA DE POLARIZAÇÃO

Tabela de Polarização			Compressão				Varredura	
Index	V _{fpol} (V)	V _{ppol} (V)	Z _L (Ω)	OCP1dB (dBm)	PAE (%)	Ganho (dB)	Psat (dBm)	PAE _{max} (%)
1	0,8	2,5	10,9-j14,16	16,8	23,6	15,9	18,3	34,2
2	0,8	2,6	14,8-j13,61	15,3	14,8	16,5	18,3	32,2
3	0,9	2,5	10,9-j14,16	17,5	26,3	13,7	18,3	31,9
4	0,9	2,6	10,9-j14,16	17,7	27,2	14,2	18,5	33,1
5	0,9	2,7	10,9-j14,16	17,8	27,3	14,5	18,7	34,0
6	0,9	2,8	10,9-j14,16	17,9	26,9	14,9	18,9	34,7
7	0,9	2,9	14,8-j13,61	17,9	25,3	15,1	18,9	33,3
8	1	2,5	10,9-j14,16	17,6	26,4	12,3	18,3	30,1
9	1	2,6	10,9-j14,16	17,8	27,1	12,6	18,5	31,2
10	1	2,7	10,9-j14,16	18,0	27,7	12,9	18,7	31,9
11	1	2,8	10,9-j14,16	18,2	27,9	13,2	18,9	32,7
12	1	2,9	10,9-j14,16	18,3	27,9	13,5	19,0	33,4
13	1,1	2,5	10,9-j14,16	17,6	25,4	11,0	18,3	28,5
14	1,1	2,6	10,9-j14,16	17,9	26,3	11,4	18,5	29,6
15	1,1	2,7	10,9-j14,16	18,1	27,0	11,7	18,7	30,5
16	1,1	2,8	10,9-j14,16	18,3	27,5	12,0	18,9	31,3
17	1,1	2,9	10,9-j14,16	18,5	27,9	12,2	19,0	31,9
18	1,15	2,6	10,9-j14,16	17,9	25,8	10,8	18,5	28,5
19	1,15	2,7	10,9-j14,16	18,1	26,5	11,1	18,7	29,4
20	1,15	2,8	10,9-j14,16	18,3	27,2	11,4	18,9	30,2
21	1,15	2,9	10,9-j14,16	18,5	27,6	11,6	19,0	30,9
22	1,2	2,6	10,9-j14,16	17,9	25,1	10,3	18,5	28,0
23	1,2	2,7	10,9-j14,16	18,1	26,0	10,6	18,7	28,9
24	1,2	2,8	10,9-j14,16	18,4	26,6	10,9	18,9	29,7
25	1,2	2,9	10,9-j14,16	18,5	27,2	11,1	19,0	30,4
26	1,3	2,9	10,9-j14,16	18,5	26,1	10,1	19,0	28,6

Analisando a tabela I, pode-se notar que os menores valores de polarização não atingiram os requisitos impostos, sendo a menor configuração de polarização 1 (0,8 V para V_{fpol} e 2,5 V para V_{ppol}), nota-se também que todos os valores de Z_L foram de 10,9-j14,16 Ω, com exceção da configuração 2 (V_{fpol} = 0,8 V e V_{ppol} = 2,6 V), sendo a Z_L = 14,8-j13,61 Ω. Esse valor é interessante pois apresentou o menor valor de OCP1dB de toda a tabela (15,3 dBm), e esse fator deve-se à maior impedância sendo aplicada na saída, gerando maior velocidade do declínio do ganho. Outro fator a ser observado, é que para cada valor de V_{fpol}, seus resultados são maximizados conforme V_{ppol} aumenta. Isso ocorre para todos os valores de V_{fpol} com exceção de 0,8 V,

no qual as configurações de maiores valores de V_{ppol} não ultrapassam os requisitos mínimos impostos.

De forma geral, os resultados apresentaram aumento ao longo das configurações, quando comparados diferentes V_{fpol} para os mesmos valores de V_{ppol}, denotando incremento generalizado na performance do PA. Entretanto, essa melhora para ao atingir a configuração 17, onde os resultados posteriores de OCP1dB atingem um platô em 18,5 V para todas as configurações com V_{ppol} = 2,9 V. Além disso, PAE também não tem incrementos após a configuração 12, mantendo seu valor em 17. O ganho, que foi maximizado na configuração 2, gerado provavelmente devido a diferença de Z_L, apresenta queda substancial até atingir 17 e só atenua ainda mais após. O Psat não apresenta grandes variações do

início ao fim das configurações, apenas 0,7 V entre seu valor menor e maior valor, mesmo assim é válido avaliar que a partir da configuração 12, os valores de P_{sat} são maximizados em todas as configurações com $V_{ppol} = 2,9$ V. Por fim, a PA_{Emax} também apresenta queda contante ao decorrer das simulações, com uma média é de 31,05%, então as configurações que apresentam valores superiores podem ser consideradas aceitáveis. Inicialmente não foram investigadas as configurações para $V_{fpol} = 1,15$ V, mas tornou-se interessante uma vez que muitos valores atingiram médias superiores em 1,1 V do que em 1,2 V. Esperando-se encontrar valores de máximo com uma configuração intermediária entre essas duas tensões. Essa expectativa, no entanto, não se confirmou, obtendo-se valores inferiores ou iguais para todas as configurações, não demonstrando vantagens em utilizar 1,15 V em relação a 1,1 V para V_{fpol} . Para melhor comparar as 3 configurações que se mostraram mais equilibradas, Fig. 4 apresenta os pontos de cada métrica para as configurações 6, 12 e 17.

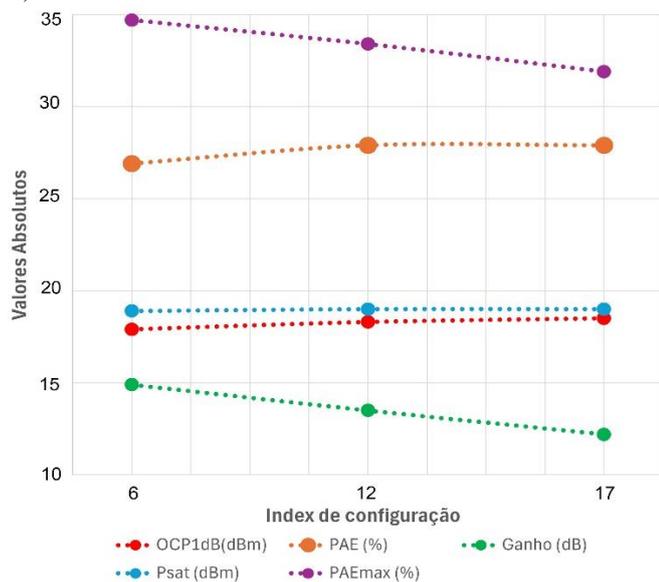


Fig. 4. Comparação de PA_{Emax} (%) em roxo, PAE (%) em laranja, P_{sat} (dBm) em azul, $OCP1dB$ (dBm) em vermelho e Ganho (dB) em verde das configurações 6, 12 e 17.

Tratando-se de melhor equilíbrio entre as métricas, algumas configurações específicas tornam-se mais adequadas. A configuração 6 demonstrou uma linearidade próxima da média, e uma PAE 1% menor que a máxima, mas compensa no ganho de 14,9 dB e PA_{Emax} 3,65% maiores que a média. A configuração 12 se mostrou adequada ao se destacar mantendo um ganho de 13,5 dB, $OCP1dB = 18,3$ dBm e altos valores de PAE (27,9 %) e PA_{Emax} (33,4 %). Por fim, a configuração 17 demonstrou ser a última com incremento em algum valor em relação as configurações anteriores para o mesmo valor de V_{ppol} , obtendo o maior valor de $OCP1dB$ da tabela, 18,5 dBm e de PAE em 27,9 %. Entretanto apresentou grande atenuação de ganho em relação às configurações destacadas anteriormente com apenas 12,2 dB.

V. CONCLUSÃO

O objetivo deste trabalho foi melhor analisar o comportamento do PA dentro dos melhores resultados encontrados em [4], a fim de otimizar sua polarização sob a ótica de ser utilizado como parte de um transmissor sem fio para dispositivos móveis. Desse modo, obter um bom equilíbrio entre linearidade, eficiência e ganho é essencial para garantir sua usabilidade em aparelhos modernos, para isso foram também impostos valores mínimos de $OCP1dB$ e Ganho, 15 dBm e 10 dB, respectivamente, assegurando que as configurações com desempenhos muito discrepantes entre as métricas não fossem avaliadas.

Nesse sentido, as três configurações que melhor satisfazem essas exigências são a 6 ($V_{fpol} = 0,9$ V e $V_{ppol} = 2,8$ V), 12 ($V_{fpol} = 1$ V e $V_{ppol} = 2,9$ V) e 17 (com $V_{fpol} = 1,1$ V e $V_{ppol} = 2,9$ V). Essas configurações conseguem prover altos valores de eficiência, sem comprometer linearidade e ganho, tornando-se ideais para a utilização prevista. Ao realizar uma comparação ainda mais direta, torna-se mais notável que a configuração 12 consegue obter qualidades próximas das outras duas configurações sem perder muito desempenho, indicando maior equilíbrio entre as três. Com essa análise foi possível não só identificar as melhores opções de polarização, como também entender mais profundamente como o PA se comporta em uma vasta gama de tensões. Em futuros trabalhos, propõe-se a realização de testes com essas polarizações em configuração pós-leiaute e multimodos, a fim melhor entender o comportamento do circuito em condições mais próximas das esperadas na utilização prática do PA.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq e ao software provido pelo programa APCI (SBMicro/CNPq/MCTI). Este trabalho é parte da atividade de pesquisa do INCT Namitec.

REFERÊNCIAS

- [1] Y. Li, B. Bakkaloglu and C. Chakrabarti, "A comprehensive energy model and energy-quality evaluation of wireless transceiver front-ends," IEEE Workshop on Signal Processing Systems Design and Implementation, Athens, Greece, 2005.
- [2] Tarui, B. Leite, "Projeto e Simulação de Amplificador De Potência Multimodos de Alta Potência e Baixa Variação de Ganho", Master 's Thesis, Federal University of Paraná, Curitiba, 2021
- [3] B. Correa, J.P. Perbiche, B. Leite, "Analysis of proper biasing in Power Amplifiers", Sforum, 2024.
- [4] B. Correa, B. Leite "Biasing analysis of an RF CMOS cascode power amplifier", Iberchip (aceito para publicação).
- [5] M. Quadros, B. Tarui, B. Leite, "Stability and Linearity Improvement in a Multi-Mode CMOS Power Amplifier", Sforum, 2022.
- [6] Sedra, A. S., & Smith, K. C. (2014). "Microelectronic Circuits" (7ª edição). Oxford University Press.