

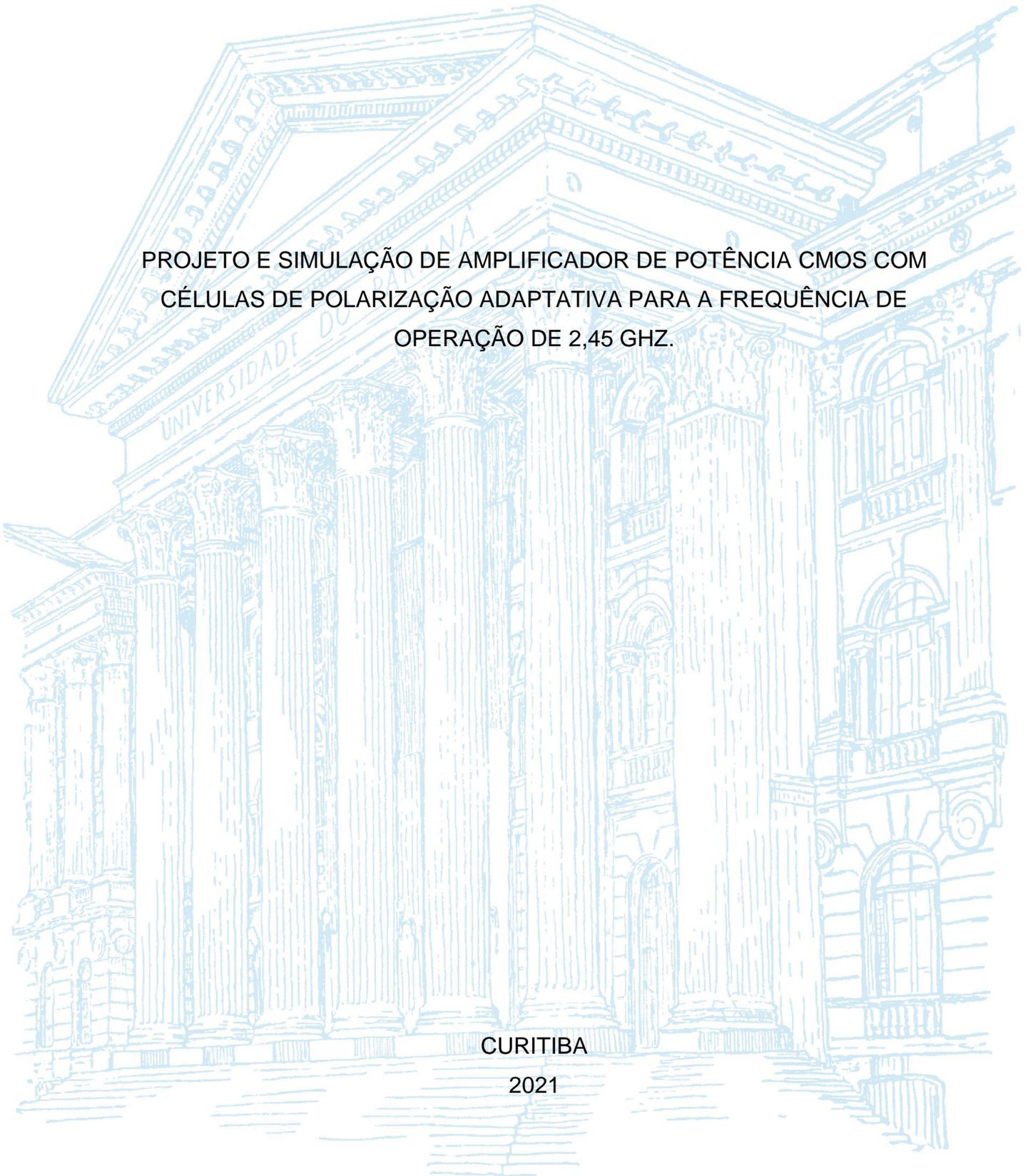
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

JOSÉ CARLOS DOS SANTOS

PROJETO E SIMULAÇÃO DE AMPLIFICADOR DE POTÊNCIA CMOS COM
CÉLULAS DE POLARIZAÇÃO ADAPTATIVA PARA A FREQUÊNCIA DE
OPERAÇÃO DE 2,45 GHZ.

CURITIBA

2021



JOSÉ CARLOS DOS SANTOS

PROJETO E SIMULAÇÃO DE AMPLIFICADOR DE POTÊNCIA CMOS COM
CÉLULAS DE POLARIZAÇÃO ADAPTATIVA PARA A FREQUÊNCIA DE
OPERAÇÃO DE 2,45 GHZ.

TCC apresentado ao curso de Engenharia Elétrica, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Bernardo Rego Barros de Almeida Leite

CURITIBA

2021

AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha família por todo o apoio durante a minha graduação, e pela compreensão nos momentos difíceis.

Agradeço a todos os meus professores e professoras que compartilharam um pouco de seu conhecimento ao longo dos anos, tanto acadêmico quanto profissional, me ajudando a me tornar a pessoa que eu sou hoje.

Agradeço também a todos os companheiros de curso, que cresceram comigo nos últimos anos e com os quais vivenciei momentos que vou levar para o resto da minha vida.

“A única coisa que torna a vida possível é uma incerteza permanente e intolerável: não saber o que vem a seguir.”

Ursula K. Le. Guin (1929 - 2018)

RESUMO

Neste trabalho é apresentado o projeto e simulação de um amplificador de potência (PA) com polarização adaptativa. O trabalho foi iniciado com o estudo bibliográfico sobre amplificadores multimodos e diferentes topologias de polarização adaptativa. A partir desse estudo e do projeto de trabalhos anteriores, utilizou-se de duas células de polarização adaptativas junto ao estágio de potência de um PA multimodos, formado por três células cascode diferenciais conectadas em paralelo. Nessa configuração, a polarização adaptativa realiza a troca dos modos de operação de maneira automática, sem precisar de um circuito externo adicional ao bloco do amplificador. Além disso, foi projetado um estágio adicional para aumentar o ganho do PA como um todo, utilizando uma topologia de duas células cascodes diferenciais conectadas em paralelo com polarização fixa. Por fim, foi obtido um amplificador de potência com ganho direto de 27,5 dB, ponto de compressão de ganho de 1 dB de ganho referente a saída (OCP_{1dB}) de 25,6 dBm e eficiência de potência adicionada no OCP_{1dB} de 18,6%, mostrando que a arquitetura utilizada apresenta linearidade e eficiência superior se comparado ao amplificador multimodos, para valores de potência de saída mais próximos a potência de saturação.

Palavras-chave: polarização adaptativa, amplificador de potência, eficiência, linearidade;

ABSTRACT

This work presents the design and simulation of a power amplifier (PA) with adaptive biasing. The work started with a bibliographic study on multimode amplifiers and different adaptive biasing techniques. Starting from this study and previous works, two adaptive bias cells were used with the power stage of a multimode amplifier, composed by three parallel differential cascode cells. In this configuration, the adaptive biasing changes the operation mode of the power stage automatically, without the necessity of an external circuit outside of the amplifier block. A new stage was designed in order to increase the amplifier's gain, using two parallel differential cascode cells with fixed biasing. The PA presents a 27.5 dB gain, a 25.6 dBm output-refered compression point of 1 dB (OCP_{1dB}) and a 18.6% power added efficiency at OCP_{1dB} , proving that the new architecture can be used to improve both efficiency and linearity from the multimode amplifier, while operating for output power values close to the saturation power.

Keywords: adaptive biasing, power amplifier, efficiency, linearity.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - DIAGRAMA DE TRANSMISSÃO E RECEPÇÃO EM RF	15
FIGURA 2 - CONSUMO DE POTÊNCIA DE UM MÓDULO RF	16
FIGURA 3 - EXEMPLO DE CIRCUITO INCONDICIONALMENTE ESTÁVEL	18
FIGURA 4 - COMPRESSÃO DO GANHO DE UM AMPLIFICADOR DE POTÊNCIA	19
FIGURA 5 - AMPLIFICADOR NA CONFIGURAÇÃO FONTE COMUM.....	21
FIGURA 6 - AMPLIFICADOR NA CONFIGURAÇÃO CASCODE COMUM	22
FIGURA 7 - TENSÃO DE POLARIZAÇÃO ADAPTATIVA EM FUNÇÃO DA ENTRADA	24
FIGURA 8 - CÉLULA DE POLARIZAÇÃO ADAPTATIVA PROPOSTA POR CHEN ET AL. (2006).....	25
FIGURA 9 - CÉLULA DE POLARIZAÇÃO ADAPTATIVA PROPOSTA POR KOO et al. (2012).....	25
FIGURA 10 - DIAGRAMA DE BLOCOS DO AMPLIFICADOR DE POTÊNCIA	27
FIGURA 11 - ESQUEMÁTICO DO ESTÁGIO DE POTÊNCIA.....	29
FIGURA 12 - CARTA DE SMITH COM O RESULTADO DA SIMULAÇÃO LOADPULL	31
FIGURA 13 - JANELA DE CÁLCULO E ESQUEMÁTICO DA REDE DE CASAMENTO DE IMPEDÂNCIA DA SAÍDA.....	31
FIGURA 14 - CIRCUITO PROPOSTO PARA A CÉLULA DE POLARIZAÇÃO ADAPTATIVA.....	33
FIGURA 15 - GANHO DO AMPLIFICADOR DISTORCIDO PELA CÉLULA DE POLARIZAÇÃO ADAPTATIVA	34
FIGURA 16 - TENSÕES DE POLARIZAÇÃO PROVENIENTES DAS CÉLULAS DE POLARIZAÇÃO ADAPTATIVA	38
FIGURA 17 - COMPARAÇÃO DO GANHO ENTRE A CONFIGURAÇÃO MULTIMODO E A POLARIZAÇÃO ADAPTATIVA.....	38
FIGURA 18 - COMPARAÇÃO DA PAE ENTRE A CONFIGURAÇÃO MULTIMODO E A POLARIZAÇÃO ADAPTATIVA	39
FIGURA 19 - ESQUEMÁTICO DO ESTÁGIO DE GANHO.....	40
FIGURA 20 - IMPEDÂNCIA DE ENTRADA DO AMPLIFICADOR EM FUNÇÃO DA FREQUÊNCIA.....	42

FIGURA 21 - JANELA DE CÁLCULO E ESQUEMÁTICO DA REDE DE CASAMENTO DE IMPEDÂNCIA DA ENTRADA	43
FIGURA 22 - PARÂMETRO DE ESTABILIDADE μ	45
FIGURA 23 - PARÂMETROS DE ESPALHAMENTO S_{11} E S_{21}	45
FIGURA 24 - GANHO DE POTÊNCIA EM FUNÇÃO DA POTÊNCIA DE SAÍDA.....	46
FIGURA 25 - PAE EM FUNÇÃO DA POTÊNCIA DE SAÍDA	46

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - COMPARAÇÃO ENTRE OS TRANSISTORES DE ÓXIDO FINO E ÓXIDO GROSSO	28
TABELA 2 - MODOS DE OPERAÇÃO DO ESTÁGIO DE POTÊNCIA	32
TABELA 3 - VALORES PROJETADOS PARA AS CÉLULAS SELA E SELB	37
TABELA 4 - VALORES AJUSTADOS PARA AS CÉLULAS DE POLARIZAÇÃO ADAPTATIVA.....	41
TABELA 5 - COMPARAÇÃO COM O ESTADO DA ARTE	47

LISTA DE ABREVIATURAS OU SIGLAS

CMOS	- Semicondutor de metal-óxido complementar
ICP _{1dB}	- Ponto de compressão de 1 dB de ganho referente a entrada
OCP _{1dB}	- Ponto de compressão de 1 dB de ganho referente a saída
PA	- Amplificador de potência
PAE	- Eficiência de potência adicionada
P _{CC}	- Potência de alimentação
P _{IN}	- Potência de entrada
P _{OUT}	- Potência de saída
P _{SAT}	- Potência de saturação
RF	- Radiofrequência
V _{DD}	- Tensão de alimentação

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
1.1 OBJETIVOS	14
1.1.1 Objetivo geral	14
1.1.2 Objetivos específicos.....	14
1.2 ORGANIZAÇÃO DO DOCUMENTO	14
2 REVISÃO DE LITERATURA	15
2.1 REVISÃO DE LITERATURA SOBRE AMPLIFICADORES DE POTÊNCIA	15
2.1.1 Métricas para PAs	16
2.1.1.1 Parâmetros de espalhamento.....	16
2.1.1.2 Parâmetro de estabilidade μ	17
2.1.1.3 Linearidade.....	18
2.1.1.4 Eficiência de potência adicionada	19
2.1.2 Principais topologias de PAs CMOS	20
2.1.2.1 Configuração fonte comum.....	20
2.1.2.2 Configuração cascode	21
2.2 AMPLIFICADORES DE POTÊNCIA MULTIMODOS	22
2.3 AMPLIFICADORES DE POTÊNCIA COM POLARIZAÇÃO ADAPTATIVA.....	23
3 PROJETO DO AMPLIFICADOR DE POTÊNCIA	26
3.1 METODOLOGIA.....	26
3.2 ARQUITETURA DO AMPLIFICADOR DE POTÊNCIA PROPOSTO	26
3.3 ESTÁGIO DE POTÊNCIA	28
3.3.1.1 Alterações na arquitetura multimodos	28
3.3.1.2 Rede de casamento de impedância da saída.....	30
3.3.1.3 Modos de operação do estágio de potência	32
3.4 CÉLULA DE POLARIZAÇÃO ADAPTATIVA.....	32
3.4.1 Projeto das células de polarização adaptativa	35
3.4.2 Comparação entre multimodo e polarização adaptativa	37
3.5 ESTÁGIO DE GANHO	40
3.5.1.1 Rede de casamento de impedância da entrada	41
4 RESULTADOS DE SIMULAÇÃO	44
4.1 RESULTADOS DO PA COMPLETO	44
4.2 COMPARAÇÃO COM O ESTADO DA ARTE	47

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	49
5.1 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	49
REFERÊNCIAS.....	51
ANEXO 1 – ESQUEMÁTICO COMPLETO DO CIRCUITO	53

1 INTRODUÇÃO

Uma das maiores preocupações em sistemas de telecomunicações é o consumo de potência dos dispositivos. Usualmente, são utilizadas baterias para a alimentação desses aparelhos, e essas baterias costumam definir a autonomia dos equipamentos, devido ao número máximo de recargas e o tempo de duração de carga. Em um circuito com uma baixa eficiência, será realizado um número maior de recargas e, conseqüentemente, será necessário realizar recargas mais frequentes ou até mesmo a troca da bateria num curto espaço de tempo. O amplificador de potência (PA) é o bloco que, geralmente, apresenta o maior consumo de potência dentro desses dispositivos. Assim, é necessário o estudo constante de técnicas capazes de melhorar a eficiência desses dispositivos.

O amplificador de potência multimodos é capaz de solucionar esse problema utilizando uma arquitetura que possibilita a utilização de vários modos do amplificador, selecionados através da aplicação externa de diferentes tensões de polarização. Para cada ponto de polarização, são obtidos valores de ganho e potência de saída (P_{OUT}) diferentes. Dessa forma, é possível sempre utilizar um modo que seja mais eficiente para a aplicação do circuito, se adequando aos níveis de potência de entrada (P_{IN}) e de saída do dispositivo.

Porém, um amplificador multimodos traz a necessidade de circuitos digitais externos, capazes de alterar o modo do amplificador automaticamente. A utilização desses circuitos aumenta a complexidade dos dispositivos, podendo tornar essa solução não muito atrativa dependendo da amplificação. A solução é a utilização de células de polarização adaptativa, que possuem a função de alterar a tensão de polarização conforme a potência de entrada do amplificador, ajustando automaticamente o ponto de polarização entre os modos de operação, excluindo a necessidade de circuitos externos.

Com essa solução, não é mais necessário que os desenvolvedores dos dispositivos de telecomunicações tenham que obter o conhecimento detalhado do amplificador de potência e, posteriormente, desenvolver circuitos externos para obter uma melhor eficácia do circuito, visto que o amplificador com polarização adaptativa já entrega essa funcionalidade.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo geral

O objetivo geral deste trabalho de conclusão de curso é o projeto de um amplificador de potência com polarização adaptativa utilizando-se a tecnologia CMOS (Semicondutor de metal-óxido complementar) de 130 nm para a operação na faixa de 2,45 GHz.

1.1.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- a) Estudo do estado da arte das células de polarização adaptativa;
- b) Projeto e simulação das células de polarização adaptativa implementados com um amplificador de potência diferencial multimodos;
- c) Análise dos parâmetros de ganho, eficiência e linearidade do amplificador;
- d) Documentação da metodologia e dos resultados.

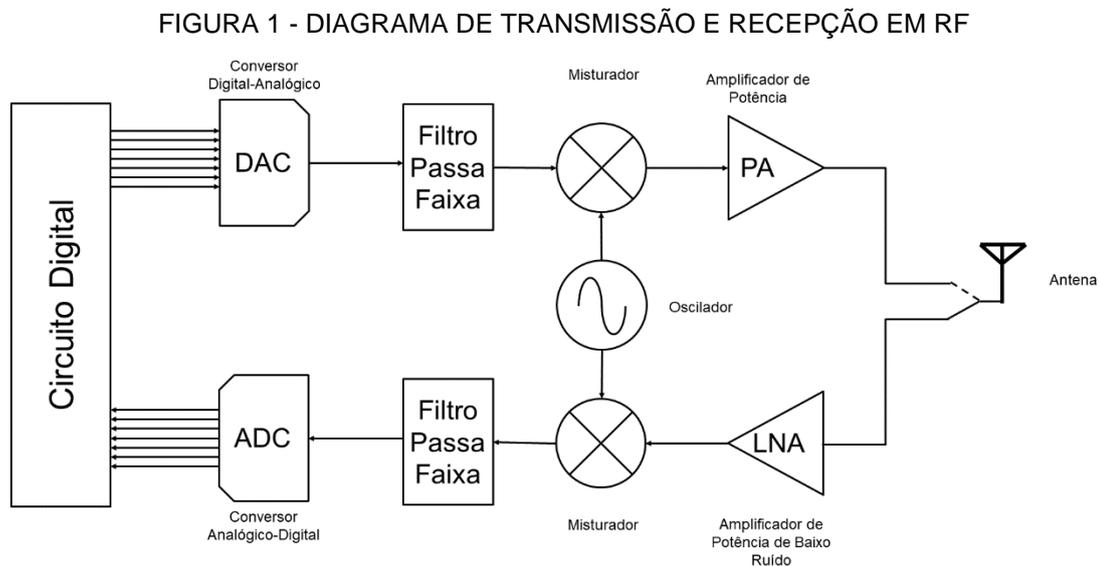
1.2 ORGANIZAÇÃO DO DOCUMENTO

Na seção 2, o amplificador de potência será apresentado, comentando sobre as principais topologias, métricas utilizadas para caracterizar um amplificador, bem como implementações de amplificadores de potência multimodos e amplificadores de potência com polarização adaptativa apresentados na literatura. Na seção 3, é feita uma breve descrição da metodologia do projeto, incluindo as etapas utilizadas para desenvolver o amplificador. Na seção 4, será mostrado o passo a passo do projeto, mostrando como foi o projeto realizado e como os valores dos componentes no circuito foram determinados. Por fim, na seção 5 serão mostrados os resultados obtidos com o trabalho, comparando as métricas obtidas neste PA com o estado da arte.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 REVISÃO DE LITERATURA SOBRE AMPLIFICADORES DE POTÊNCIA

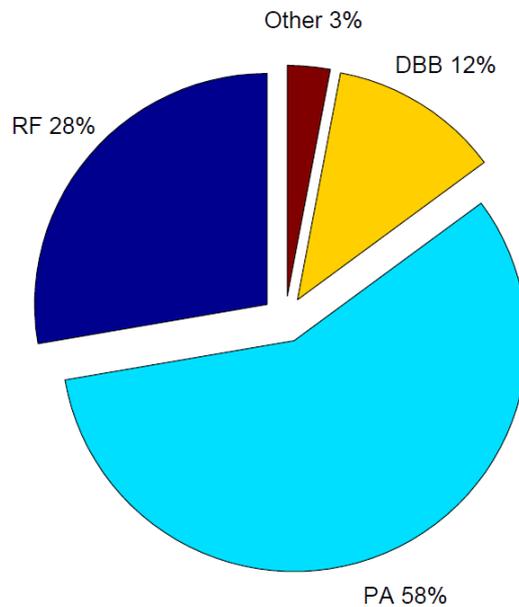
Os amplificadores de potência são uma parte importante de sistemas de comunicação, especificamente para os transmissores. Localizados logo antes da antena em um sistema de transmissão de radiofrequência (RF), conforme a FIGURA 1, é responsável por amplificar o sinal até um nível de potência adequado para realizar a transmissão, de maneira a garantir que o sinal possa ser recebido e interpretado corretamente.



Fonte: O autor (2021).

Um problema intrínseco dos PAs é o seu alto consumo de potência em relação aos outros componentes do sistema de transmissão, conforme a FIGURA 2, podendo representar aproximadamente 60% do consumo de potência do módulo RF conforme MUSIIGE (2013). Assim, durante o projeto de um amplificador, é importante conhecer os requisitos necessários de eficiência, ganho e linearidade do projeto a ser implementado, de forma a garantir que consumo de potência do PA seja reduzido e, conseqüentemente, que o módulo RF apresente uma eficiência maior.

FIGURA 2 - CONSUMO DE POTÊNCIA DE UM MÓDULO RF



Fonte: MUSIIGE (2013).

2.1.1 Métricas para PAs

Para a caracterização de amplificadores de potência, existem diferentes métricas que podem ser observadas, as quais nos auxiliam a entender como o PA em questão funciona e qual seria a sua aplicação. Neste projeto, foram utilizadas as métricas obtidas através da análise dos parâmetros de espalhamento (pequenos sinais) e do equilíbrio harmônico (grandes sinais) do circuito.

2.1.1.1 Parâmetros de espalhamento

Os parâmetros de espalhamento são utilizados para descrever um circuito eletrônico em relação as suas portas (tanto de entrada quanto de saída), através de coeficientes que podem representar a reflexão (uma porta com ela mesma) ou a transmissão (entre uma porta e outra) das ondas incidentes e refletidas deste circuito, formando a matriz de espalhamento. Esses parâmetros são obtidos através da análise do comportamento do circuito em pequenos sinais. Para um amplificador de potência, são dados os parâmetros de espalhamento para duas portas, conforme demonstra a equação 1:

$$S = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix}. \quad (1)$$

Os parâmetros S_{11} e S_{22} representam a qualidade do casamento de impedância na entrada e na saída, respectivamente, em relação ao ganho de pequenos sinais. Quanto menor o valor desses parâmetros, pode-se concluir que maior será o ganho do circuito, visto que existem menos perdas nas redes de casamento.

Os parâmetros S_{12} e S_{21} representam o ganho inverso e direto do circuito, respectivamente. Para o ganho direto, deseja-se o maior valor possível, enquanto para o ganho inverso se deseja valores menores, representando uma boa isolação entre a saída e a entrada do amplificador.

Para um amplificador de potência, os parâmetros mais utilizados durante o projeto são o S_{11} e S_{21} , visto que o parâmetro S_{22} mede a qualidade do casamento de impedância em relação ao ganho máximo de pequenos sinais, mas em amplificadores de potência, é priorizada a potência de saída do circuito em relação ao ganho do PA. Enquanto isso, a análise do parâmetro S_{12} está inclusa dentro do parâmetro de estabilidade μ , visto que quanto menor a isolação entre a saída e a entrada, maior a chance de oscilação do circuito.

2.1.1.2 Parâmetro de estabilidade μ

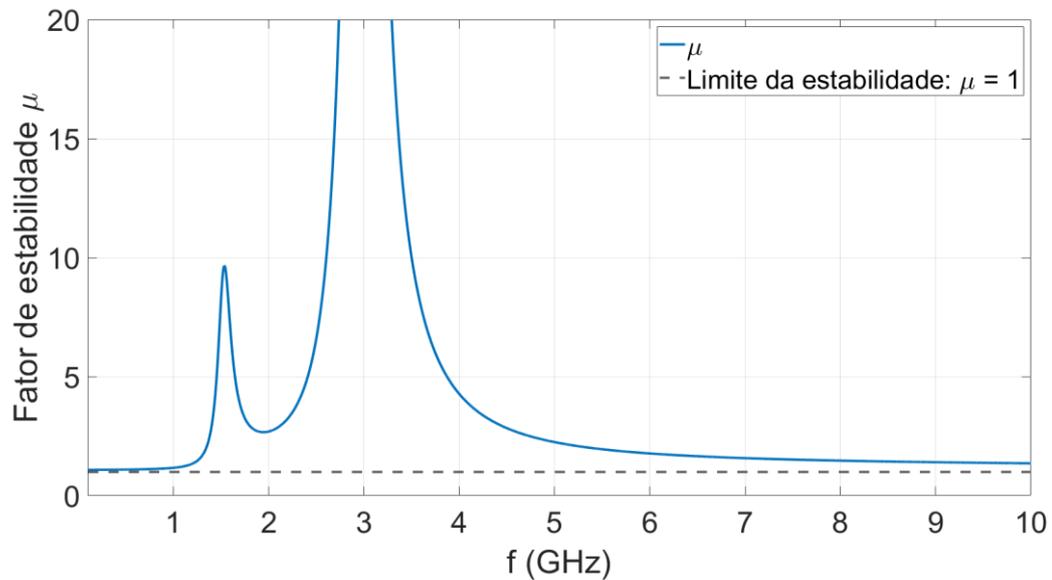
Ao implementar um amplificador de potência, é possível que o circuito seja levado a instabilidade devido a presença de realimentação do sinal ou a um ganho excessivo em frequências fora da banda de operação do PA. Essa instabilidade faz com que o circuito deixe de funcionar com um amplificador e se torne um oscilador, levando a falha do equipamento. Como essa instabilidade depende das impedâncias de entrada e saída conectadas ao PA, um amplificador é dito incondicionalmente estável se ele for estável para qualquer valor de impedância, tanto na entrada quanto na saída.

O parâmetro utilizado neste trabalho para determinar essa estabilidade é o parâmetro μ , calculado a partir dos parâmetros de espalhamento, conforme a equação 2:

$$\mu = \frac{1 - |S_{11}|^2}{|S_{11}^*(S_{11}S_{22} - S_{12}S_{21}) - S_{22}| + |S_{12}S_{21}|} \quad (2)$$

Um amplificador é considerado incondicionalmente estável se não houver nenhuma frequência para a qual o parâmetro μ seja inferior a 1, conforme o exemplo da FIGURA 3.

FIGURA 3 - EXEMPLO DE CIRCUITO INCONDICIONALMENTE ESTÁVEL



Fonte: O autor (2021).

2.1.1.3 Linearidade

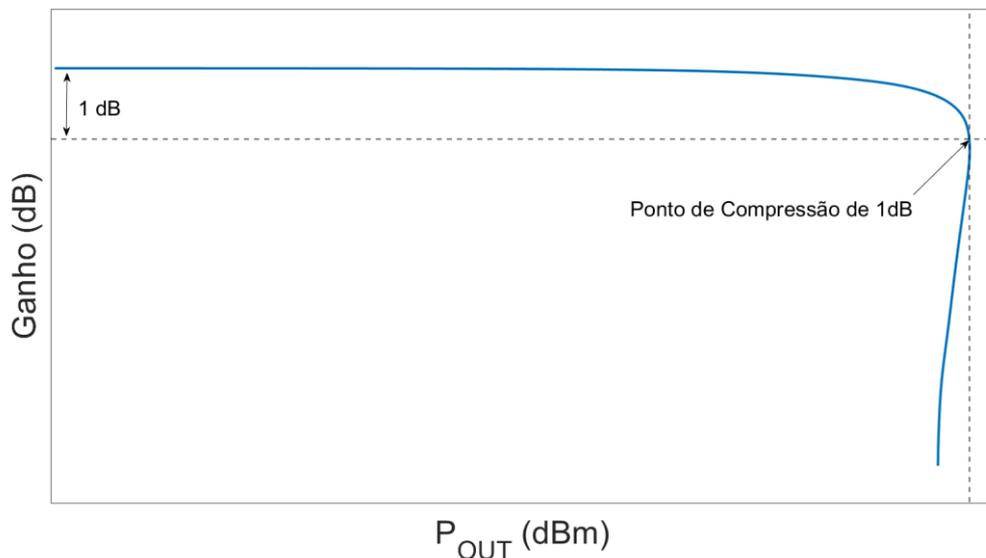
Um circuito é dito linear se, para um certo sinal de entrada, o sinal de saída é diretamente proporcional a essa entrada em amplitude e se a fase da saída for idêntica a fase da entrada.

Um amplificador é, por natureza, um circuito não linear. Devido aos limites de ganho, faixa de operação e tensão de alimentação do circuito (V_{DD}), conforme o sinal de entrada, a saída acaba apresentando certas distorções. Essas distorções podem ser dos tipos AM-AM (amplitude por amplitude), AM-PM (amplitude por fase) e PM-PM (fase por fase), conforme apresentado por REYNAERT et al. (2006).

Neste trabalho, o foco será sobre a distorção AM-AM. Uma das métricas utilizadas para descrever esse efeito é o ponto de compressão de 1 dB. Esse ponto marca o momento em que o ganho de um amplificador de potência passa a ser 1 dB

inferior ao ganho máximo do amplificador, indicando que o PA saiu da sua zona de comportamento linear. Essa métrica pode ser determinada tanto em relação P_{OUT} , resultando no ponto de compressão de 1 dB referente a saída (OCP_{1dB}) ou em relação a P_{IN} , resultando no ponto de compressão de 1 dB referente a entrada (ICP_{1dB}). O comportamento da compressão do ganho de um amplificador pode ser observado na FIGURA 4. A partir do ponto de compressão, o PA perde a sua linearidade, mas apresenta um ganho na sua eficiência. Além disso, nota-se a presença da potência de saturação (P_{SAT}), que indica o valor máximo de potência disponível na saída do amplificador.

FIGURA 4 - COMPRESSÃO DO GANHO DE UM AMPLIFICADOR DE POTÊNCIA



Fonte: O autor (2021).

2.1.1.4 Eficiência de potência adicionada

A eficiência de potência adicionada (PAE) é uma métrica que mede a eficiência do amplificador, levando em conta o ganho do circuito. Uma forma mais tradicional é de calcular a eficiência utilizando a eficiência de dreno, conforme a equação 3:

$$\eta = \frac{P_{OUT}}{P_{CC}} \quad (3)$$

Considerando dois dispositivos com valores idênticos de P_{OUT} e potência de alimentação (P_{CC}) mas com valores de ganhos diferentes, utilizando a eficiência de

dreno, será obtido o resultado que os dois PAs apresentam a mesma eficiência, porém, devido a diferença nos ganhos, o amplificador com ganho superior pode ser considerado como o melhor PA em termos de eficiência. Essa diferença pode ser identificada pela PAE, que é calculada conforme a equação 4:

$$PAE = \frac{P_{OUT} - P_{IN}}{P_{CC}}. \quad (4)$$

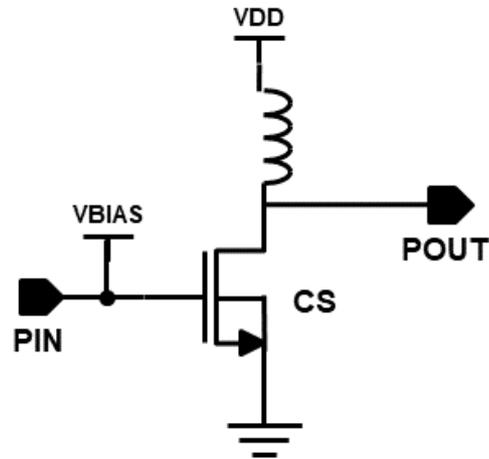
2.1.2 Principais topologias de PAs CMOS

Na literatura, são apresentadas diversas configurações possíveis de transistores para a construção de PAs, cada uma apresentando suas particularidades e aplicações específicas. Num geral, as duas configurações mais presentes são a configuração fonte comum e a configuração cascode.

2.1.2.1 Configuração fonte comum

A configuração fonte comum se dá com um transistor tendo a fonte conectada ao potencial de terra, a porta conectada ao sinal de entrada e a tensão de polarização e o dreno conectado ao sinal de saída e a tensão de alimentação, conforme apresentado na FIGURA 5. Essa configuração tem como principais vantagens o alto ganho, alta impedância de entrada e simplicidade de projeto, mas em contra partida, apresenta baixa isolação entre os sinais de saída e de entrada, conforme apresentado por NIKNEJAD (2005). Além disso, não é possível ter um grande controle no ligamento e desligamento em células na configuração fonte comum, visto que o sinal de entrada e a tensão de polarização estão conectadas a mesma entrada.

FIGURA 5 - AMPLIFICADOR NA CONFIGURAÇÃO FONTE COMUM

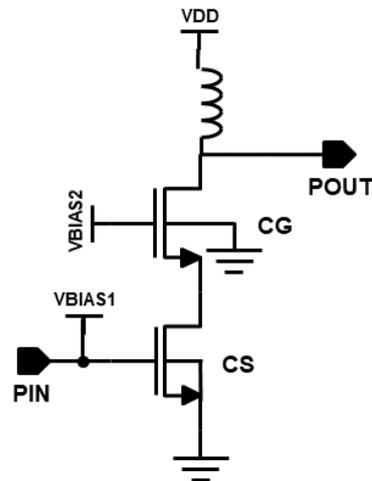


Fonte: O autor (2021).

2.1.2.2 Configuração cascode

A configuração cascode se dá pela associação de um transistor na configuração fonte comum a um transistor na configuração porta comum, conforme apresentado na FIGURA 6, podendo também ser representado como um amplificador de dois estágios. Assim, a configuração cascode mantém as qualidades da configuração fonte comum (ganho e alta impedância de entrada), mas apresenta melhorias na estabilidade do amplificador. Além disso, é possível ativar ou desativar uma célula cascode facilmente através do transistor na configuração porta comum. Uma das desvantagens dessa configuração é a queda de tensão entre os transistores, impossibilitando o uso do cascode em aplicações que precisam de valores baixos de V_{DD} (o que não costuma ser o caso para PAs).

FIGURA 6 - AMPLIFICADOR NA CONFIGURAÇÃO CASCODE COMUM



Fonte: O autor (2021).

2.2 AMPLIFICADORES DE POTÊNCIA MULTIMODOS

Observando as dificuldades de se implementar um PA que atenda todos os requisitos de ganho, eficiência e linearidade, existem várias técnicas que surgiram na literatura para contornar estes problemas. A primeira técnica apresentada é o amplificador de potência multimodos.

O objetivo dessa arquitetura é alterar o modo de operação do amplificador de acordo com a potência de saída, com o objetivo de utilizar o modo que disponibiliza um dado P_{OUT} com o menor valor de P_{CC} .

Nos últimos anos, diferentes arquiteturas para PAs multimodos foram apresentadas. DOS SANTOS (2015) apresentou um amplificador em que o estágio de ganho era composto por três células cascodes em paralelo, em que a ativação ou não dessas células resulta em diferentes ganhos para o amplificador. Assim, tem-se um PA com o OCP_{1dB} constante, mas com ganho variável, contendo 6 modos de operação distintos.

SANTOS (2016) apresentou um amplificador com uma arquitetura similar a DOS SANTOS (2015), mas com as três células cascode no estágio de potência ao invés do estágio de ganho, resultando em um PA com OCP_{1dB} variável.

Por fim, TARUI (2018) propõe uma arquitetura na qual ambos os estágios de ganho e potência são configuráveis através das células cascode. Os modos de operação foram escolhidos de forma que o ganho permanecesse constante

independente do modo de operação do estágio de saída, de forma a manter a linearidade do circuito mesmo durante a comutação dos modos. Assim, foi possível alcançar um amplificador multimodos com 4 modos de operação com valores de OCP_{1db} distintos, mas com o mesmo ganho de potência.

Nota-se que, para todas estas referências, a alteração do modo de operação resulta na mudança da potência consumida pelo amplificador.

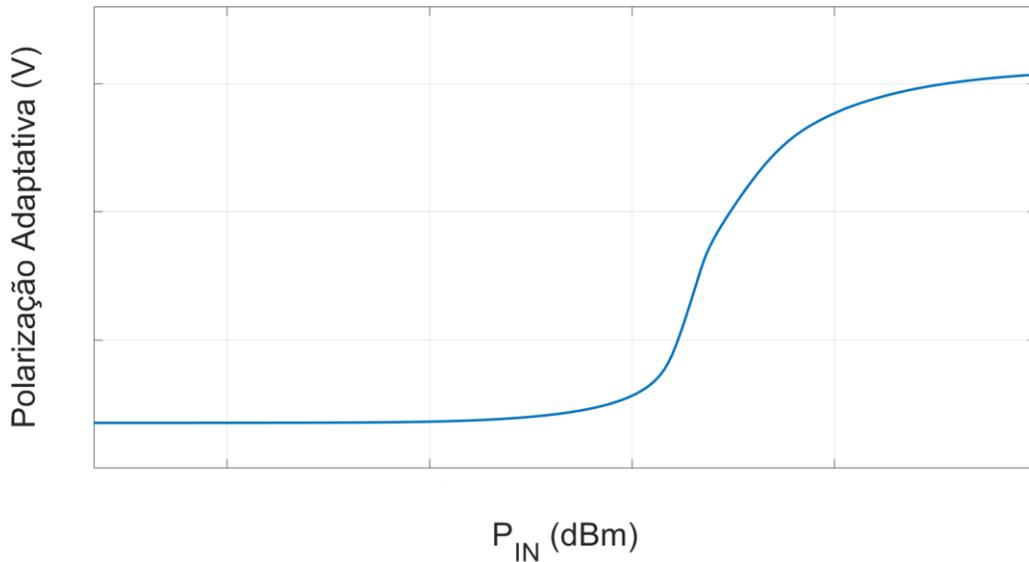
2.3 AMPLIFICADORES DE POTÊNCIA COM POLARIZAÇÃO ADAPTATIVA

Uma dificuldade na utilização de amplificadores multimodos é a necessidade de um circuito digital que seja capaz de realizar a comutação entre os modos de operação sem causar distorções, além de selecionar de forma precisa qual o melhor modo para um certo P_{OUT} , trazendo etapas adicionais na implementação física do PA. De forma a contornar esse problema, podem ser utilizadas as células de polarização adaptativa.

As células de polarização adaptativa são circuitos capazes de gerar uma tensão de polarização para os transistores do amplificador conforme a potência de entrada. Para potências baixas, a tensão de saída costuma ser constante em um nível baixo, mas quando P_{IN} começa a crescer a partir de um certo limiar, a tensão de polarização aumenta de acordo, permitindo que os transistores sejam polarizados de forma a disponibilizar uma P_{OUT} maior, conforme apresentado por HAN et al. (2006).

Um PA com polarização adaptativa pode funcionar de modo que para valores baixos de P_{IN} , onde não é necessário que os transistores do circuito estejam operando com tensões de polarizações altas, a célula de polarização adaptativa fornece uma baixa tensão de polarização. Conforme o P_{IN} aumenta, é necessário que os transistores operem num ponto de polarização mais elevado, e a célula de polarização adaptativa realiza a função de aumentar a polarização dos transistores. Dessa forma, utilizar a polarização adaptativa reduz o consumo do circuito quando a potência de entrada é baixa, fazendo com que os transistores só drenem uma corrente maior quando não for possível alcançar os valores de P_{OUT} desejados com a polarização utilizada para baixas potências. A FIGURA 7 apresenta o comportamento de uma polarização adaptativa.

FIGURA 7 - TENSÃO DE POLARIZAÇÃO ADAPTATIVA EM FUNÇÃO DA ENTRADA

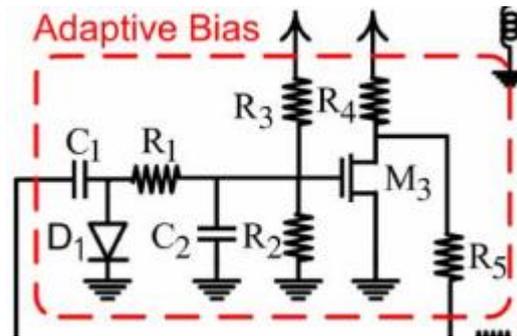


Fonte: O autor (2021).

CHEN et al. (2006) propõem uma célula de polarização adaptativa conforme apresentado na FIGURA 8. Essa célula funciona a partir de uma pequena parcela de P_{IN} passando pelo retificador de meia onda composto por C_1 e D_1 e em seguida passando pelo filtro passa baixa composto por R_1 e C_2 para obter uma tensão CC negativa que se relaciona ao valor de P_{IN} . Para valores baixos de P_{IN} , M_3 permanece fechado, com a tensão de saída sendo aproximadamente zero. Aumentando P_{IN} , a corrente de M_3 diminui, aumentando a tensão de saída como consequência, até uma P_{IN} limite para o qual a tensão de saída é igual a de alimentação.

Nesta arquitetura, o ponto de limiar para a célula ser ativada é controlado pelos valores de R_1 e pela proporção de R_2 e R_3 , enquanto a taxa de crescimento da tensão de saída por P_{IN} é controlada pelos valores de R_4 .

FIGURA 8 - CÉLULA DE POLARIZAÇÃO ADAPTATIVA PROPOSTA POR CHEN ET AL. (2006)

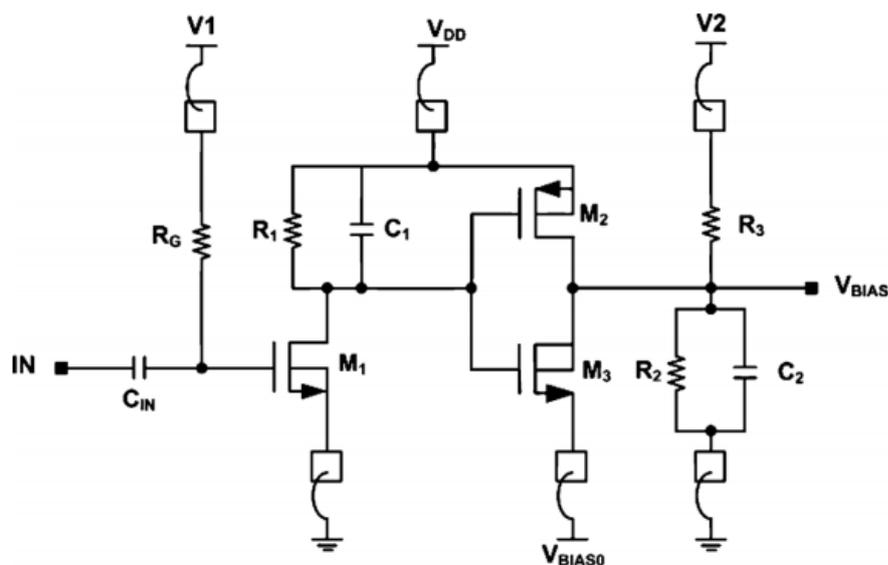


Fonte: Adaptado de CHEN et al. (2006)

KOO et al. (2012) propõem uma célula de polarização adaptativa conforme apresentado na FIGURA 9. Ele funciona a partir da detecção da envoltória do sinal de entrada – uma vez que essa entrada está acima de uma certa tensão de limiar definida no projeto. Essa tensão de limiar depende da tensão de polarização do transistor M_1 – em outras palavras, da tensão V_1 .

Assim, quando o sinal de entrada apresenta um valor maior que o limiar, o transistor M_1 passa a conduzir, reduzindo a tensão na porta do transistor M_2 de V_{DD} para um valor menor. Portanto, a tensão de saída V_{BIAS} passa a aumentar a partir da tensão V_{BIAS0} . Logo, quanto maior a potência do sinal de entrada, maior vai ser a tensão V_{BIAS} disponibilizada por esse amplificador.

FIGURA 9 - CÉLULA DE POLARIZAÇÃO ADAPTATIVA PROPOSTA POR KOO et al. (2012)



Fonte: KOO et al. (2012).

3 PROJETO DO AMPLIFICADOR DE POTÊNCIA

3.1 METODOLOGIA

O trabalho constitui-se no desenvolvimento das etapas de projeto de um amplificador de potência com polarização adaptativa. As etapas foram projetadas, simuladas e validadas utilizando a plataforma *Cadence Virtuoso*. A arquitetura do circuito foi definida como um amplificador diferencial de dois estágios, no qual o estágio de ganho possui ganho fixo e o estágio de potência é projetado com a topologia multimodos, utilizando as células de polarização adaptativa para a troca automática dos modos. O projeto do PA foi dividido nas seguintes etapas:

1. Escolha do transistor.
2. Adaptação do estágio de potência utilizado em trabalhos anteriores.
 - a. Troca dos indutores por indutores de conexão central.
 - b. Projeto do circuito de casamento de impedância da saída.
3. Projeto das células de polarização adaptativa.
 - a. Dimensionamento das células.
4. Projeto do estágio de ganho.
 - a. Dimensionamento do circuito.
 - b. Ajuste fino nas células de polarização adaptativa.
 - c. Projeto do circuito de casamento de impedância da entrada.

3.2 ARQUITETURA DO AMPLIFICADOR DE POTÊNCIA PROPOSTO

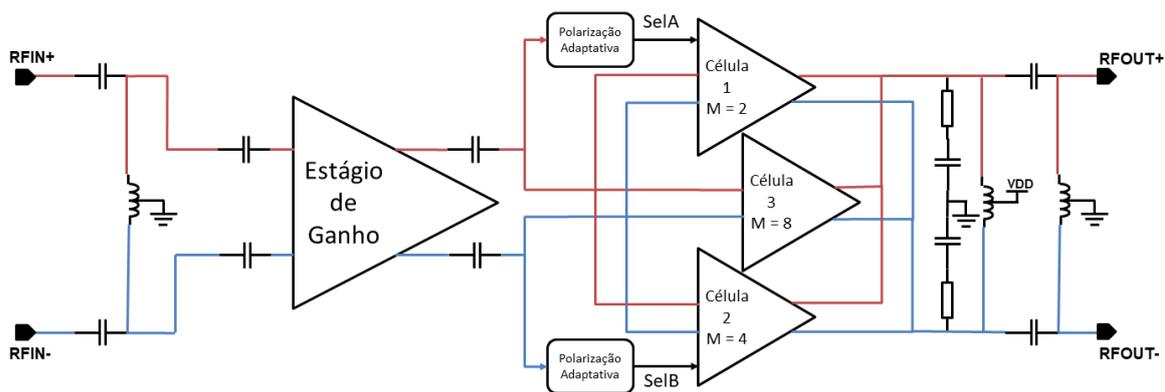
Este trabalho utiliza a arquitetura de um amplificador de potência de dois estágios: um estágio de ganho com o ganho de potência fixo, e um estágio de potência utilizando a arquitetura multimodos, com três células cascode diferentes conectadas em paralelo com multiplicidades diferentes, sendo possível ativar cada uma das células de forma independente. A utilização das células cascode é feita conforme as vantagens da mesma citadas na seção Revisão de Literatura.

A definição dos modos de operação desse amplificador multimodos é realizada através de quais células estão ativadas no momento, visto que é possível ativar as células 1, 2 e 3 (conforme representado na FIGURA 10) individualmente.

As diferentes combinações de células resultam numa largura de canal efetiva, e quanto maior a largura, maior o OCP_{1dB} do estágio de potência. Assim, é utilizada uma nomenclatura binária para definir os modos, de 000 até 111, indicando se as células 1, 2 e 3 estão desligadas (bit 0) ou ligadas (bit 1), respectivamente. Quanto todas as células desligadas, pode ser utilizado o termo de modo de baixa potência, assim como com todas as células ligadas, têm-se o termo de modo de alta potência.

Junto ao estágio de potência, foram utilizadas duas células de polarização adaptativa, de maneira a selecionar automaticamente o modo do estágio de potência através de duas das três células do circuito. O diagrama de blocos do projeto completo é apresentado na FIGURA 10, mostrando as redes de casamento na entrada e na saída, os dois estágios do amplificador, as duas células de polarização adaptativa e uma rede RC após o estágio de potência para melhorar a estabilidade do circuito.

FIGURA 10 - DIAGRAMA DE BLOCOS DO AMPLIFICADOR DE POTÊNCIA



Fonte: O autor (2021).

Para este projeto, foram escolhidos transistores de óxido grosso ao invés de transistores de óxido fino. Essa escolha decorre da máxima tensão permitida entre os terminais do transistor para que não ocorra ruptura do óxido durante a aplicação, conforme mostra a TABELA 1. A escolha do transistor de óxido grosso permite que potências de saída maiores sejam atingidas pelo projeto, devido aos limites de tensão serem superiores. Em contra partida, o valor mínimo de comprimento do canal desses transistores também é superior ao de óxido fino. Porém, isso não causa um grande impacto nos PAs, visto que os indutores presentes para as redes de casamento de impedância e para a polarização ocupam uma área muito maior do

que os transistores. Neste projeto, todos os transistores utilizaram o comprimento do canal de 240 nm, conforme o valor mínimo especificado na TABELA 1.

TABELA 1 - COMPARAÇÃO ENTRE OS TRANSISTORES DE ÓXIDO FINO E ÓXIDO GROSSO

Parâmetro	Óxido fino	Óxido grosso
Tensão máxima entre os terminais (porta, fonte e dreno)	1,6 V	2,7 V
Tensão máxima entre terminal comum (porta, fonte e dreno) e terminal de corpo	2,6 V	4,7 V
Comprimento mínimo do canal	120 nm	240 nm

FONTE: Cadence Virtuoso – Design Kit and Technology Training BiCMOS8HP

3.3 ESTÁGIO DE POTÊNCIA

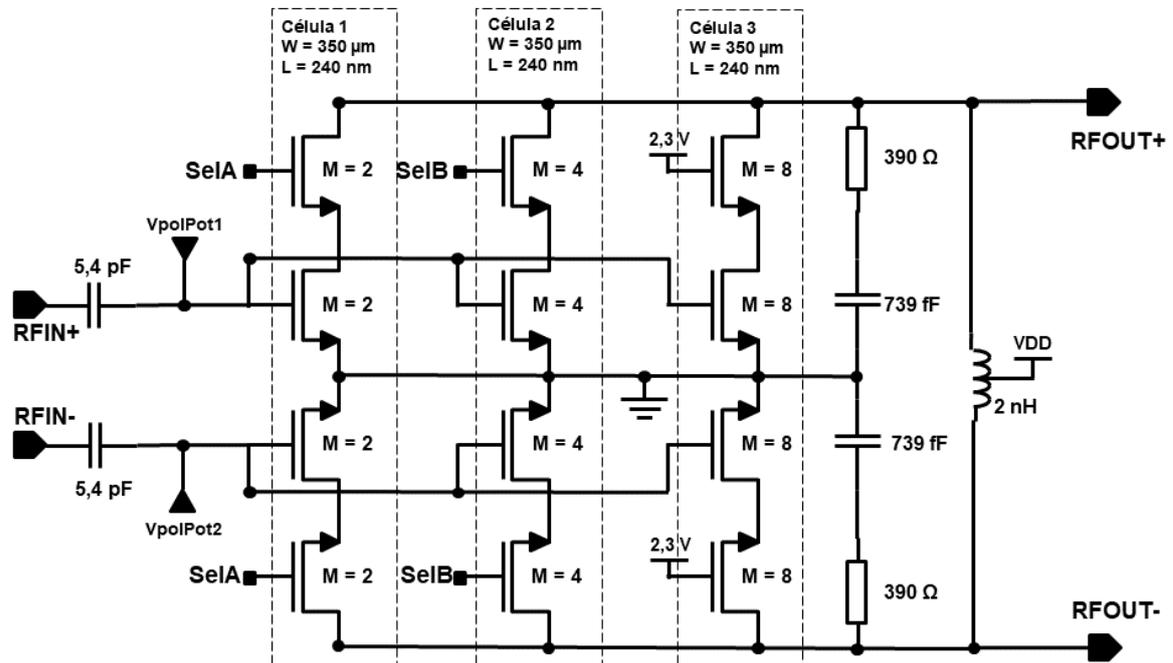
Devido ao foco deste projeto ser a implementação das células de polarização adaptativa junto a um estágio de potência multimodos, o circuito deste estágio foi adaptado do trabalho de TARUI (2018).

3.3.1.1 Alterações na arquitetura multimodos

A principal alteração no esquemático foi realizado nos indutores do circuito. Por se tratar de um circuito diferencial, todos os indutores são utilizados aos pares: um para o ramo positivo e outro para o ramo negativo da entrada diferencial, de forma a manter o circuito simétrico. Essa utilização acaba resultando num grande número de indutores, que por consequência, aumenta a área utilizada no leiaute por esses componentes. Como forma de diminuir esse problema, além de melhorar um pouco a eficiência do circuito, foram utilizados indutores com conexão central.

Com esta alteração, cada par de indutor foi substituído por um indutor com o dobro da indutância original, mas devido a conexão central, foi possível manter o funcionamento do circuito idêntico ao original. Essa troca diminui o número de indutores no circuito, diminuindo também a área ocupada, já que mesmo que os novos indutores sejam maiores, eles ainda ocupam menos espaço comparado ao par de indutores, embora acabe dificultando a conexão dos elementos no leiaute do circuito. Essas alterações resultam no esquemático apresentado na FIGURA 11.

FIGURA 11 - ESQUEMÁTICO DO ESTÁGIO DE POTÊNCIA



Fonte: O autor (2021).

No esquemático, todos os transistores têm largura de canal unitária de 350 μm , com M indicando o fator de multiplicidade de cada um dos transistores. As tensões SelA e SelB são provenientes das duas células de polarização adaptativa. A rede de realimentação RC é utilizada para melhoria da estabilidade do circuito. O indutor tem função de isolamento entre a alimentação do circuito e o sinal RF, além de fazer parte do casamento de impedância na saída, assim como o capacitor na entrada tem como função isolar a tensão de polarização VpolPot da tensão proveniente da saída do estágio de ganho, auxiliando também no casamento de entrada entre o estágio de ganho e de potência. Por fim, a tensão de polarização VpolPot é de 1,16 V e a tensão de alimentação V_{DD} é de 3,1 V, conforme dimensionado por TARUI (2018).

Outra alteração significativa foi nos modos de operação do estágio de potência. O circuito original continha três células que podiam ser ativadas por tensões externas, resultando em sete modos de operação (desconsiderando o modo em que todas as células estão desligadas). Para este trabalho, duas das células são ativadas pela polarização adaptativa, tornando necessário que a terceira célula permaneça ativa em todas as situações, já que conforme a FIGURA 11, essa é a

célula com maior multiplicidade dos transistores e, conseqüentemente, tem o maior impacto na potência de saída. Assim, para este trabalho, esse estágio possui somente quatro modos de operação, visto que somente as duas primeiras células são ligadas e desligadas, enquanto a terceira célula permanece ativa com uma tensão de polarização de 2,3 V.

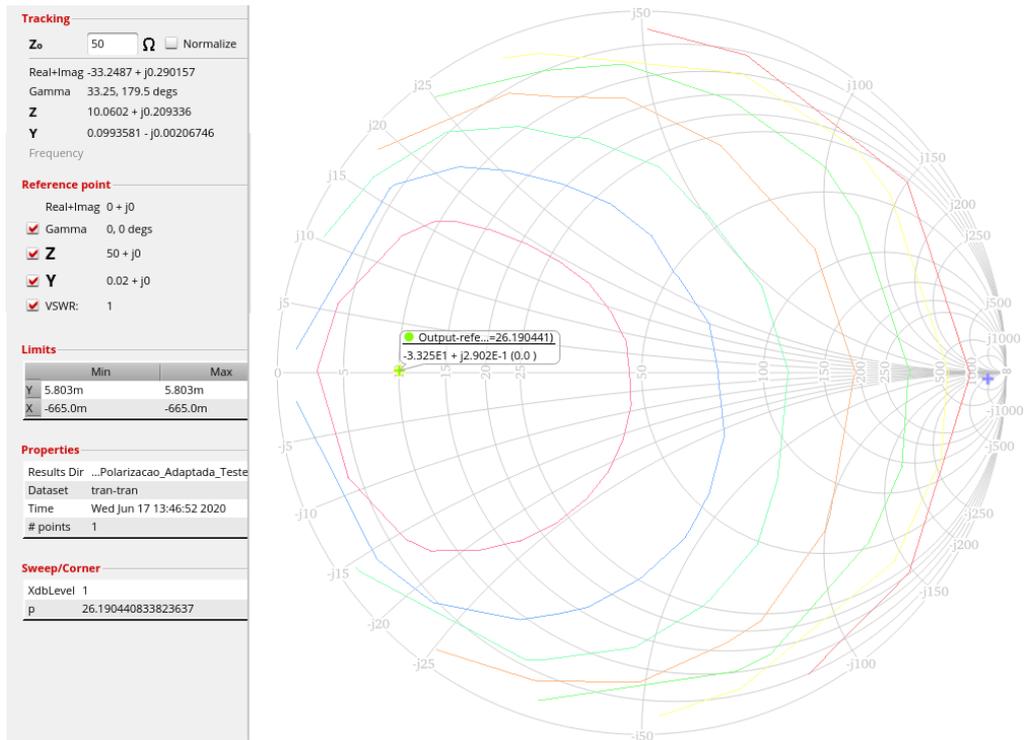
3.3.1.2 Rede de casamento de impedância da saída

No trabalho original, a rede de casamento de impedância da saída foi projetada considerando o estágio no modo de alta potência, ou seja, o modo de operação com o maior ganho e OCP_{1dB} . Com isso, os melhores resultados de eficiência e linearidade eram obtidos para este modo.

Neste trabalho, a proposta de utilizar a polarização adaptativa faz necessário com que o ganho para valores baixos de P_{IN} . Assim, em termos de ganho, considera-se que o circuito sempre está operando no modo de baixa potência. Assim, para obter os melhores resultados com o ganho reduzido, a rede de casamento de impedância foi projetada utilizando o modo de baixa potência do circuito original. Para esse projeto, foi realizada uma simulação *loadpull* do estágio de potência com as duas células desativadas, conforme apresentado na FIGURA 12.

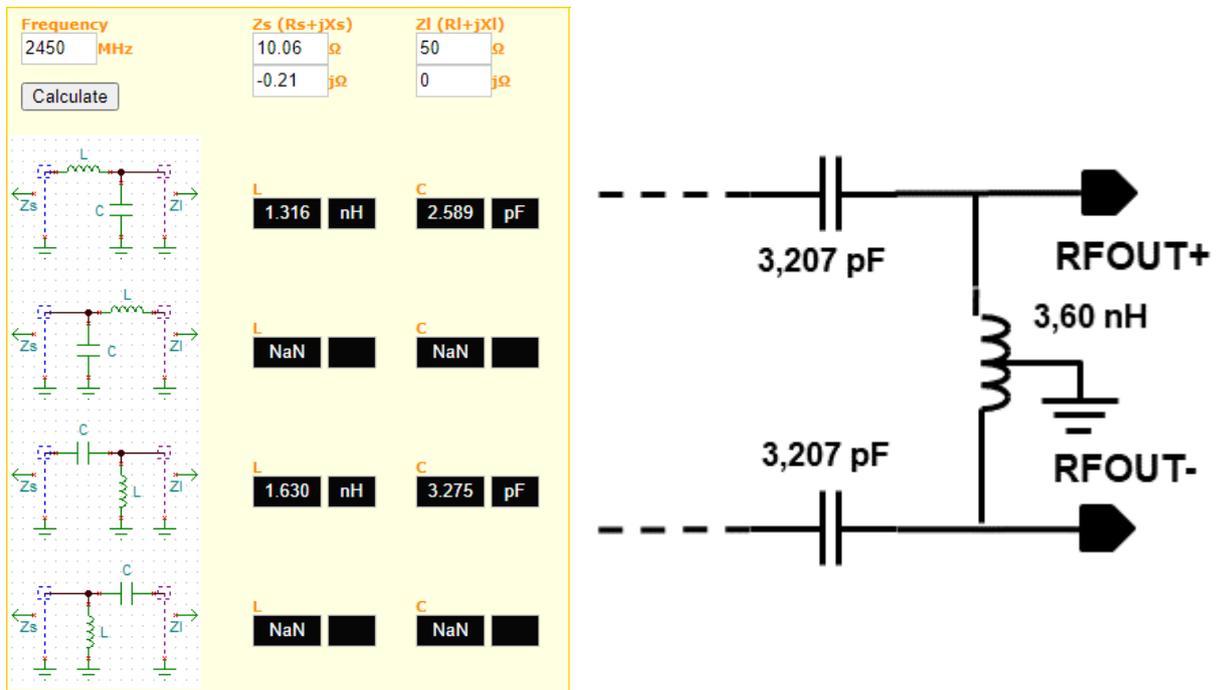
Com o resultado da simulação, nota-se que a impedância de saída escolhida para maximizar o OCP_{1dB} é $Z = 10,06 + j0,21 \Omega$, obtendo um valor para o ponto de compressão de 26,19 dBm. Com esse ponto, foi calculada uma nova rede de casamento de impedância, através de uma calculadora online gratuita disponível no site LE LEIVRE (acesso em 2020). Nota-se que, na calculadora, é necessário colocar o complexo conjugado do valor obtido pela simulação de *loadpull* para que a condição de impedância de saída seja satisfeita, visto que essas calculadoras costumam sintetizar as redes de casamento para ganho, nas quais o complexo conjugado é a condição para máxima transferência de potência. Os valores do cálculo da rede e o esquemático resultante estão apresentados na FIGURA 13.

FIGURA 12 - CARTA DE SMITH COM O RESULTADO DA SIMULAÇÃO LOADPULL



Fonte: O autor (2021).

FIGURA 13 - JANELA DE CÁLCULO E ESQUEMÁTICO DA REDE DE CASAMENTO DE IMPEDÂNCIA DA SAÍDA



Fonte: O autor (2021).

A diferença nos valores dos componentes ocorre devido a calculadora projetar os valores dos componentes com suas versões ideais, sem considerar os efeitos parasitas. A partir dos valores calculados, é feita uma otimização local nesses parâmetros, verificando se essa alteração resulta em alguma mudança significativa na rede. Assim, foi encontrando um valor ótimo para a capacitância de 3,207 pF e indutância de 1,80 nH. Nota-se que a indutância apresentada no esquemático é do indutor com conexão central, assim, é o dobro da indutância dada pela calculadora.

3.3.1.3 Modos de operação do estágio de potência

A Tabela 3 apresenta os valores de OCP_{1dB} , ganho direto e PAE para cada uma das 4 combinações do estágio de potência, utilizando a rede de casamento projetada.

TABELA 2 - MODOS DE OPERAÇÃO DO ESTÁGIO DE POTÊNCIA

Modo de Operação	OCP_{1dB} (dBm)	Ganho (dB)	PAE @ OCP_{1dB} (%)	PAE máxima (%)
00	22,8	9,1	16,3	18,6
01	24,9	11,4	18,1	26,4
10	24,1	10,5	18,5	23,1
11	25,1	12,2	15,7	28,2

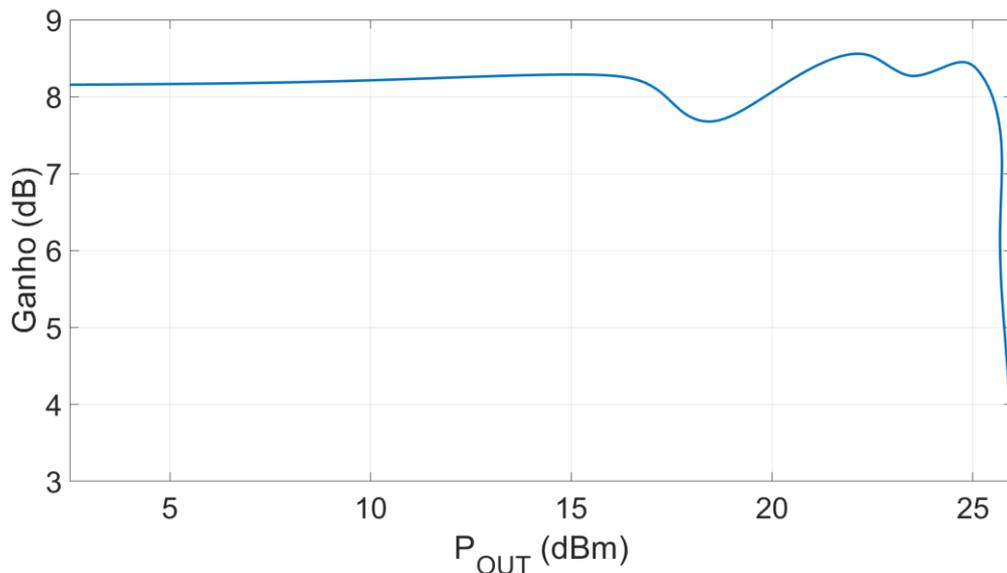
FONTE: O autor (2021).

Nota-se que para os dois com maior ganho (01 e 11), o valor da PAE no ponto de compressão diminui comparado ao modo 10, que apresenta um ganho menor. Isso ocorre devido ao projeto da rede de casamento de impedância ter sido realizada para o ganho do modo 00, assim, quanto maior o ganho, mais distante a PAE no ponto de compressão fica da PAE máxima do circuito, que continua aumentando em conjunto ao valor do ganho.

3.4 CÉLULA DE POLARIZAÇÃO ADAPTATIVA

período desta transição em que a tensão de saída se encontra abaixo da tensão de limiar dos transistores, o transistor não opera na região de saturação, resultando num decréscimo do ganho no começo da ativação da célula adaptativa, como pode ser observado na FIGURA 15.

FIGURA 15 - GANHO DO AMPLIFICADOR DISTORCIDO PELA CÉLULA DE POLARIZAÇÃO ADAPTATIVA



Fonte: O autor (2021).

Embora essa distorção não afete o OCP_{1dB} , visto que a ondulação é inferior a 1 dB do ganho máximo do amplificador (a partir do qual o ponto de compressão é definido), durante o projeto foi dada preferência para obter uma curva de ganho sem oscilações, mesmo que deteriorando a eficiência do circuito.

De forma a contornar este problema, o transistor M_3 é adicionado na configuração de diodo junto de uma tensão de entrada V_{LOW} . Com isso, para a situação em que a célula está desativada, a tensão vai assumir um valor proporcional a V_{LOW} (considerando as perdas do diodo), mantendo os transistores do amplificador já na região de saturação. Isso deteriora o consumo de potência do circuito, visto que os transistores estão ativados, mas sem interferir muito no ganho do circuito, além de adicionar a necessidade de novas tensões de entrada do circuito, mas é uma perda necessária para poder manter o circuito o mais linear possível.

Por fim, com a nova célula proposta, é possível obter um controle preciso das tensões de nível baixo e alto na saída da célula através das tensões V_{HIGH} e V_{LOW} , controle da potência de limiar do circuito através de R_1 e da proporção dos valores entre R_2 e R_3 .

3.4.1 Projeto das células de polarização adaptativa

O projeto das duas células foi realizado utilizando o simulador Spectre do *software* Cadence Virtuoso. Inicialmente, foi montado um esquemático conforme a FIGURA 14 com valores genéricos para os componentes. Através de um circuito de teste, foi feita uma análise em relação ao impacto de cada componente no comportamento do circuito, além de serem estabelecidos os valores de mínimo e máximo de cada elemento do circuito para que a célula não ficasse descaracterizada.

Em seguida, as duas células foram conectadas a entrada do estágio de potência, em que cada célula está conectada a um ramo diferente da entrada diferencial. Essa conexão é importante pois este circuito acaba consumindo um pouco da potência de entrada, então deve existir uma preocupação para não deixar a entrada diferencial desbalanceada, podendo causar distorções na saída do amplificador.

Os circuitos de polarização adaptativa conectados as células cascode 1 e 2 do estágio de potência devem ser diferentes, já que devido a diferença de multiplicidade, o impacto resultante da ativação destas células são diferentes. Além disso, é necessário projetar os dois circuitos em conjunto devido ao impacto que a polarização adaptativa possui para valores baixos de P_{IN} , visto que não é possível desativar as células completamente com 0 V, devido as dificuldades apresentadas na FIGURA 15.

Na sequência, os valores de V_{LOW} foram definidos de maneira a manter o ganho do estágio de potência em aproximadamente 8 dB para pequenos sinais. Essa decisão é feita para evitar um dimensionamento do estágio de ganho que acabe precisando de um valor alto para OCP_{1dB} . Para esta etapa do projeto, os valores da potência de limiar foram jogados a valores muito superiores de ICP_{1dB} , garantindo que a ativação da polarização adaptativa não iria interferir no ganho do amplificador para pequenos sinais. Os valores ótimos de polarização dos

transistores foram de 1,5 V para SelA e 0,42 V para SelB, o que resulta em valores de V_{LOW} de 2,0 V e 0,9 V, respectivamente. A escolha de um valor muito maior para SelA do que SelB é em decorrência das multiplicidades dos transistores, visto que se os valores fossem mais próximos ou até mesmo invertido entre as polarizações, os transistores com multiplicidade 4 iriam acabar drenando valores muito superiores de corrente e, conseqüentemente, aumentando o consumo do circuito. Ambos os valores de V_{HIGH} foram mantidos em 2,3 V, já que é a tensão utilizada para ativar a célula.

Durante o projeto, foi definido que a ordem de ativação da polarização adaptativa seria primeiramente SelA e, em seguida, SelB. Essa ordem também é explicada pela diferença de multiplicidade do amplificador: como SelB está conectada a célula de multiplicidade 4, quando a polarização é ativada, existe uma contribuição muito maior para o ganho e, conseqüentemente, para o OCP_{1dB} do circuito, conforme a Tabela 3. Assim, seria necessário ativar SelA para um valor muito maior de P_{IN} , causando os valores dos componentes a ficarem numa situação mais crítica, e levando em conta as imprecisões na fabricação do circuito, iria diminuir as chances de o amplificador funcionar fisicamente. Como a contribuição de SelA para P_{OUT} é inferior, as duas células serão ativadas em valores de P_{IN} mais próximos, sendo possível utilizar valores similares de resistência entre os dois circuitos.

Por fim, a última etapa do projeto foi feita considerando a potência de limiar das células de polarização adaptativa como, aproximadamente, o valor de ICP_{1dB} dos modos de operação: para SelA, é utilizado o ICP_{1dB} do modo 00 e, para SelB, o ICP_{1dB} do modo 10. O objetivo é fazer com que o ganho do circuito passe a aumentar através da polarização adaptativa no exato momento em que o ganho começaria a comprimir. Dessa forma, ambos os efeitos se cancelam, tornando o ganho aproximadamente constante. Além disso, também é esperado que o ponto de compressão seja superior ao modo 11, já que para altas potências, as três células do estágio de potência serão ativadas, mas a referência de ganho para a compressão permanecerá ao ganho de aproximadamente 8 dB. Nesta etapa, os valores de SelA foram definidos enquanto SelB permanece desativo e, na seqüência, os valores de SelB foram definidos com SelA funcionando normalmente. A Tabela 4 detalha todos os valores dos componentes e das tensões de entrada das duas células de polarização adaptativa.

TABELA 3 - VALORES PROJETADOS PARA AS CÉLULAS SELA E SELB

Componente	SelA	SelB
R1	600 Ω	
R2	7,5 k Ω	
R3	3,2 k Ω	2,65 k Ω
R4	10 k Ω	20 k Ω
R5	25 k Ω	
C1	1,0 pF	
C2	10,0 pF	
M1	W = 2 μ m M = 2	
M2	W = 15 μ m M = 1	
M3	W = 15 μ m M = 2	
V _{LOW}	2,0 V	0,9 V
V _{HIGH}	2,3 V	

FONTE: O autor (2021).

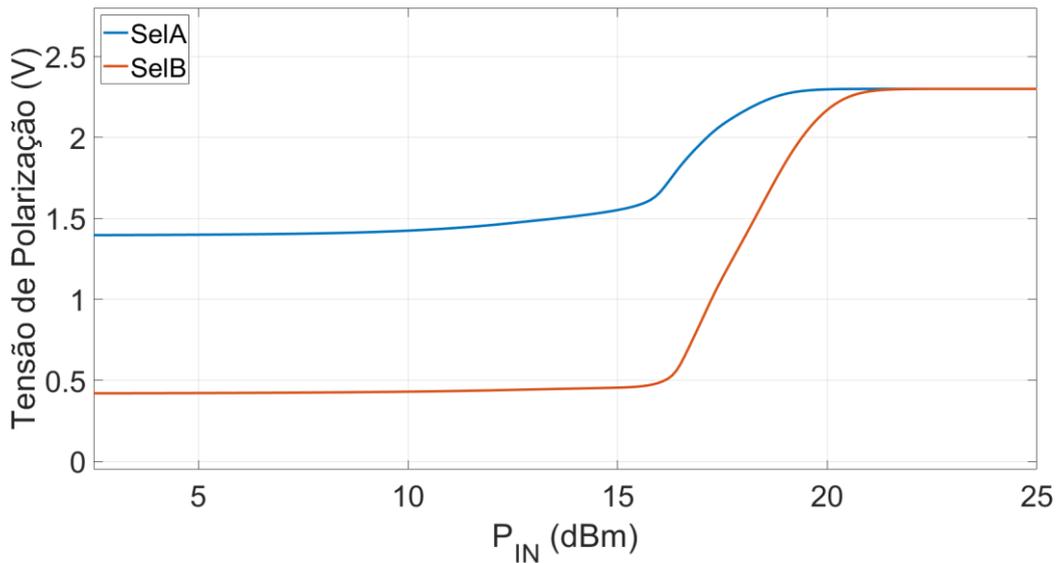
3.4.2 Comparação entre multimodo e polarização adaptativa

É realizada uma comparação do funcionamento do estágio de potência em conjunto das células de polarização adaptativa com o funcionamento do estágio de potência no modo multimodo, verificando assim se existe, de fato, uma vantagem na utilização da polarização adaptativa. A FIGURA 16 apresenta as tensões de saída do circuito de polarização adaptativa.

A FIGURA 17 apresenta as curvas de ganho pela potência de saída do amplificador provenientes da simulação hb. Nota-se que o ganho direto do amplificador com polarização adaptativa é inferior ao do modo 00, visto que existe uma perda no ganho devido a utilização dos circuitos de polarização adaptativa, além da influência das tensões de polarização proveniente das células quando P_{IN} é baixo. A polarização adaptativa funcionou conforme o esperado, visto que mesmo após a região na qual o ganho do modo 00 entrou em compressão, a curva de ganho do modo de polarização adaptativa permanece constante, resultando numa

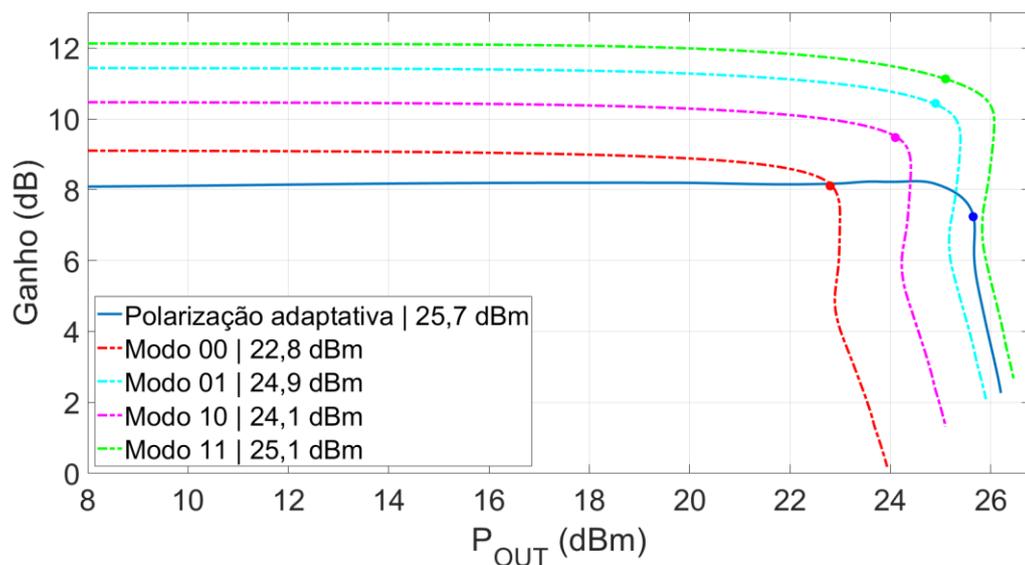
melhoria no OCP_{1dB} do amplificador. Conforme o esperado, o ganho do amplificador com polarização adaptativa começa a decair na mesma região em que o ganho do modo 11 cai, visto que para ambos os casos os transistores na configuração porta comum estão sendo polarizados com uma tensão de 2,3 V.

FIGURA 16 - TENSÕES DE POLARIZAÇÃO PROVENIENTES DAS CÉLULAS DE POLARIZAÇÃO ADAPTATIVA



Fonte: O autor (2021).

FIGURA 17 - COMPARAÇÃO DO GANHO ENTRE A CONFIGURAÇÃO MULTIMODO E A POLARIZAÇÃO ADAPTATIVA



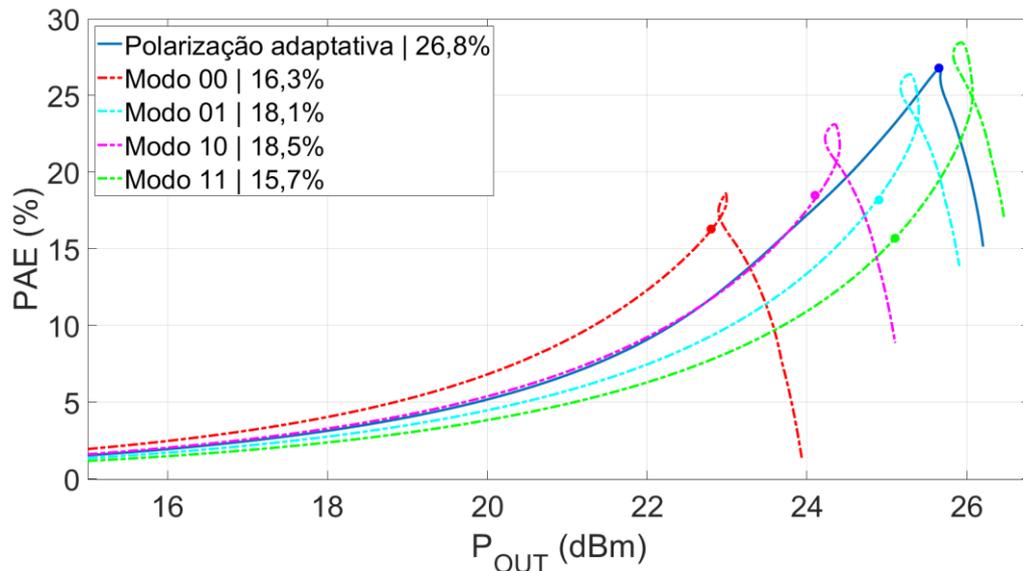
Fonte: O autor (2021).

LEGENDA: Gráfico com as curvas de ganho para o estágio de potência funcionando como amplificador multimodo e com polarização adaptativa, com os pontos destacando a localização de OCP_{1dB} .

A FIGURA 18 apresenta os gráficos da PAE do amplificador em função da potência de saída. Para baixas potências, a PAE da polarização adaptativa é similar a PAE do modo 01 até o OCP_{1dB} deste modo de operação. A partir desse ponto, nota-se a influência da polarização adaptativa, com o circuito apresentando uma PAE superior aos modos 10 e 11 para quase todos os valores de potência de saída. Com isso, nota-se que é mais vantajoso utilizar a polarização adaptativa para altas potências, enquanto em baixas potências, a utilização dos modos de baixa potência do amplificador multimodos se torna mais eficiente.

O principal resultado da polarização adaptativa é que foi possível obter uma PAE máxima próxima do OCP_{1dB} , como pode ser visto na FIGURA 18, ao invés de na região mais não-linear do amplificador. Esse resultado demonstra um grande ganho na eficiência do circuito em relação aos PAs tradicionais.

FIGURA 18 - COMPARAÇÃO DA PAE ENTRE A CONFIGURAÇÃO MULTIMODO E A POLARIZAÇÃO ADAPTATIVA



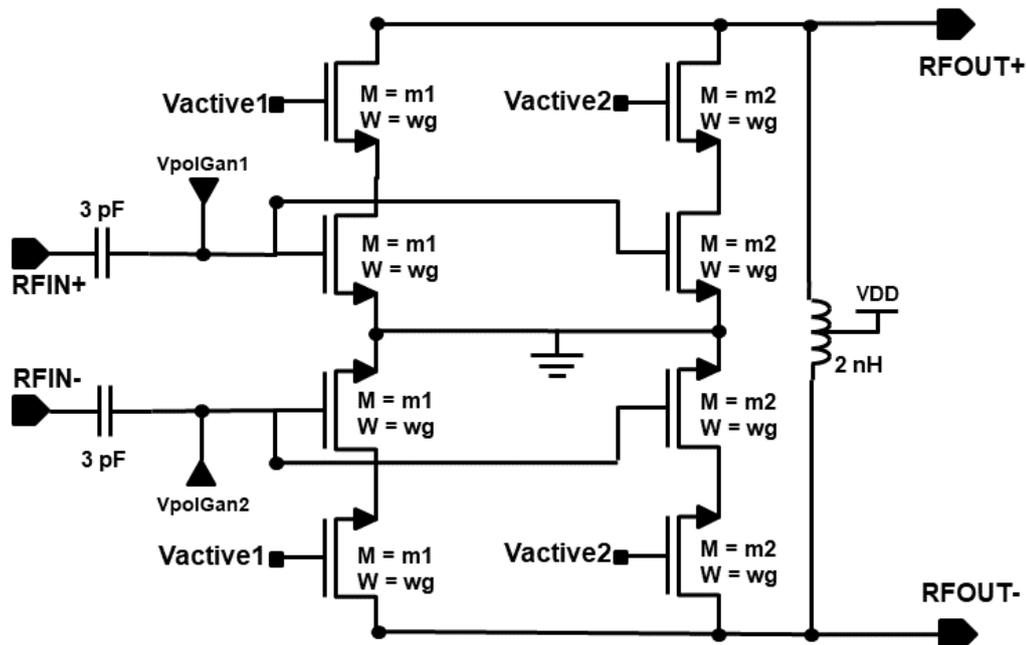
Fonte: O autor (2021).

LEGENDA: Gráfico com as curvas da PAE para o estágio de potência funcionando como amplificador multimodo e com polarização adaptativa, com destaque para os valores da PAE no OCP_{1dB} .

3.5 ESTÁGIO DE GANHO

Neste trabalho, o principal objetivo do estágio de ganho é elevar o ganho direto do amplificador de potência implementado. Ao contrário do estágio de potência, o estágio de ganho apresentará um ganho fixo para toda a zona de operação do PA. Assim, o estágio de ganho é constituído por duas células cascode em paralelo, cada uma sendo polarizada por entradas de tensão idênticas. A arquitetura proposta está representada na FIGURA 19.

FIGURA 19 - ESQUEMÁTICO DO ESTÁGIO DE GANHO



Fonte: O autor (2021).

Ao contrário do estágio de potência, as duas células em paralelo não são utilizadas para formar um PA multimodos, mas sim para testar a técnica de polarização segmentada. Esse tipo de polarização se baseia em um transistor com proporção W/L em dois transistores conectados em paralelo, um com $2W/3L$ e outro com $W/3L$, com cada um desses transistores opera numa tensão de polarização diferente. Essa discrepância nas tensões pode causar melhorias no ponto de compressão e da linearidade do circuito, conforme apresenta LUONG et al. . Assim, para atender a condição da divisão dos transistores, o valor de wg foi igual em todos os componentes, e o valor de $m2$ é projetado para sempre ser o dobro de $m1$.

Para dimensionamento desses componentes, foi utilizado o V_{DD} de 3,1 V e V_{polGan} de 1,14 V, enquanto tanto $V_{active1}$ e $V_{active2}$ foram mantidos iguais a 2,3 V. O valor inicial para w_g foi de 80 μm , conforme o trabalho de TARUI (2018), e os valores de multiplicidade foram definidos como 1 e 2, respectivamente. Na sequência, esses valores foram alterados iterativamente de forma que o circuito completo do PA apresentasse um ganho direto superior a 25 dB. Para cada valor de w_g testado, várias combinações de multiplicidade foram verificadas, com m_1 sendo variado entre 1 e 6. Essas simulações foram realizadas utilizando um capacitor de 3 pF como casamento de entrada, o qual foi mantido no circuito final.

Por fim, foram encontrados os valores para o estágio de ganho de $w_g = 70 \mu\text{m}$ e $m_1 = 4$ (consequentemente, $m_2 = 8$), resultando num ganho direto de aproximadamente 27 dB. Devido a introdução do estágio de ganho, foi necessário realizar ajustes nos componentes da célula de polarização adaptativa, devido as diferenças entre a fonte real utilizada para o projeto das células comparada a saída proveniente do estágio de ganho. Esses ajustes estão apresentados na Tabela 5.

TABELA 4 - VALORES AJUSTADOS PARA AS CÉLULAS DE POLARIZAÇÃO ADAPTATIVA

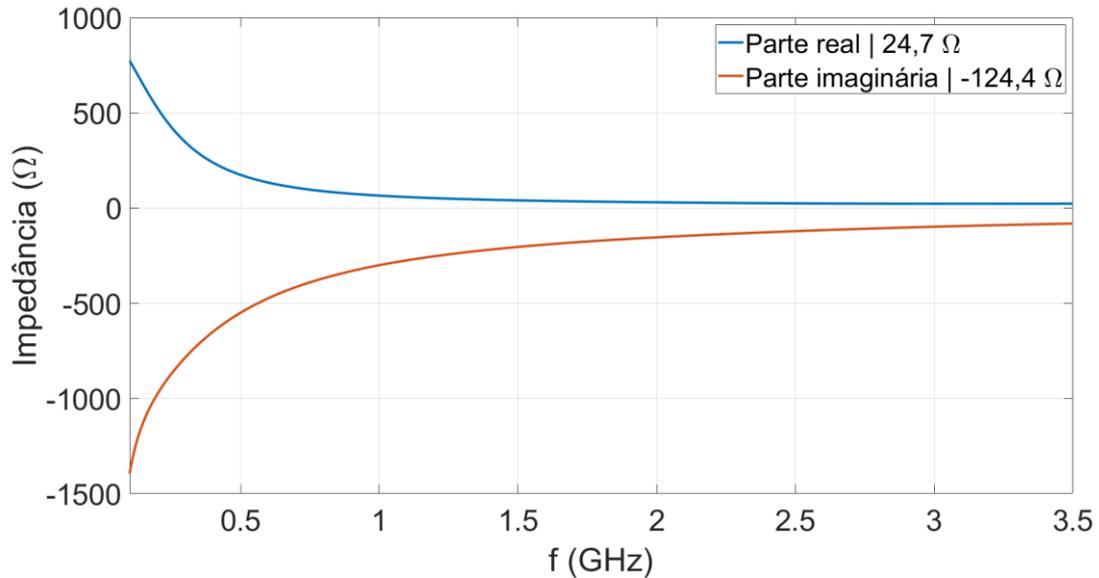
Componente	SeIA	SeIB
R3	3,3 k Ω	2,7 k Ω

Fonte: O Autor (2021).

3.5.1.1 Rede de casamento de impedância da entrada

O objetivo da rede de casamento de impedância na entrada é fazer com que a reflexão na entrada do circuito seja mínima, indicando a máxima transferência de potência possível. Observando o parâmetro S_{11} da matriz de espalhamento, um casamento de impedância é considerado ótimo quando assume valores inferiores a -10 dB na frequência de operação, que neste trabalho é de 2,45 GHz. Para esse projeto, foi realizada uma simulação variando a frequência de operação do amplificador e observando os valores da parte real e da parte imaginária da impedância de entrada, conforme apresentado na FIGURA 20.

FIGURA 20 - IMPEDÂNCIA DE ENTRADA DO AMPLIFICADOR EM FUNÇÃO DA FREQUÊNCIA



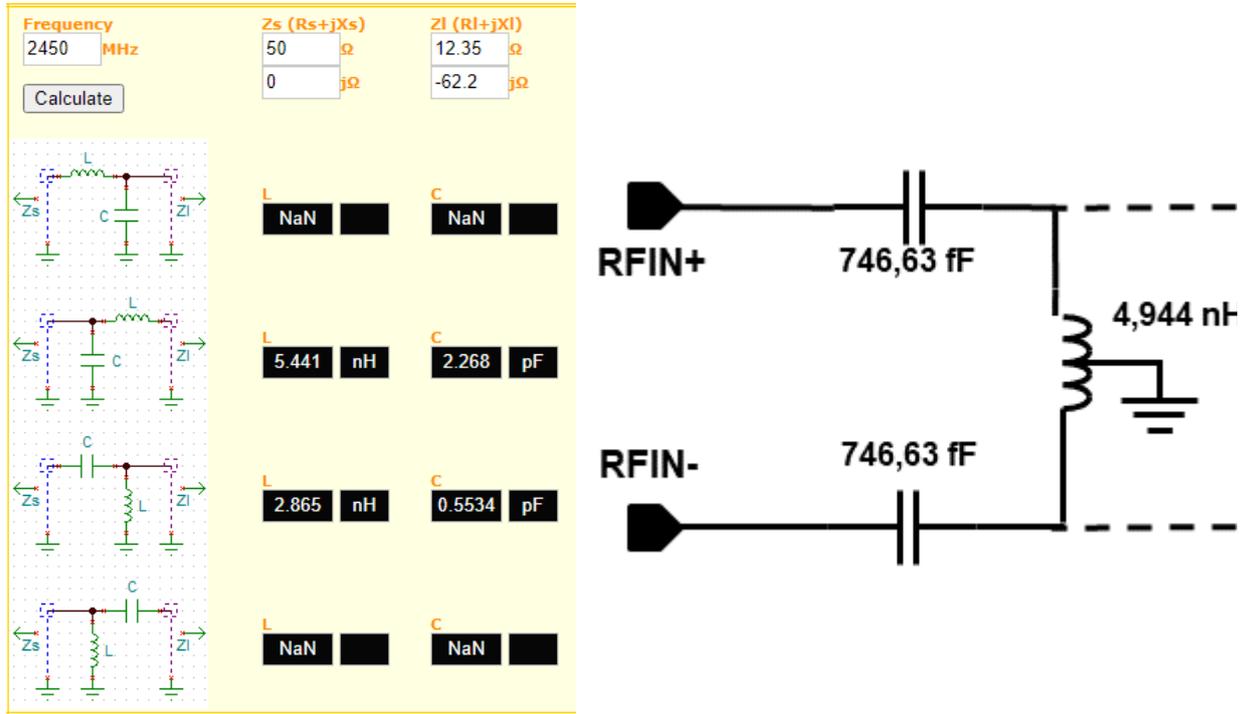
Fonte: O autor (2021).

LEGENDA: Gráfico com a parte real e parte imaginária da impedância de entrada do amplificador em função da frequência, com destaque para ambos os valores na frequência de 2,45 GHz.

Com o auxílio da calculadora LE LEIVRE, foi feito o cálculo da rede de casamento de impedância considerando a impedância de fonte igual a 50 Ω, conforme a FIGURA 21. Visto que o amplificador apresenta uma impedância diferencial 100 Ω, e a impedância vista pela simulação também é diferencial, é necessário dividir os valores apresentados no gráfico pela metade na hora de utilizar eles na calculadora da rede de impedância. A rede resultante é apresentada na FIGURA 21.

Novamente, a diferença dos valores calculados e dos valores do esquemático se dá devido a utilização dos elementos da tecnologia, que inclui os efeitos parasitas dos componentes nos resultados. Assim, foi realizada uma otimização local nos valores dos componentes para obter o melhor resultado.

FIGURA 21 - JANELA DE CÁLCULO E ESQUEMÁTICO DA REDE DE CASAMENTO DE IMPEDÂNCIA DA ENTRADA



Fonte: O autor (2021).

4 RESULTADOS DE SIMULAÇÃO

Nesta seção, serão apresentados e discutidos os resultados obtidos pelos circuitos projetados, apresentado o resultado do PA completo, bem como uma comparação dos resultados obtidos com o estado da arte.

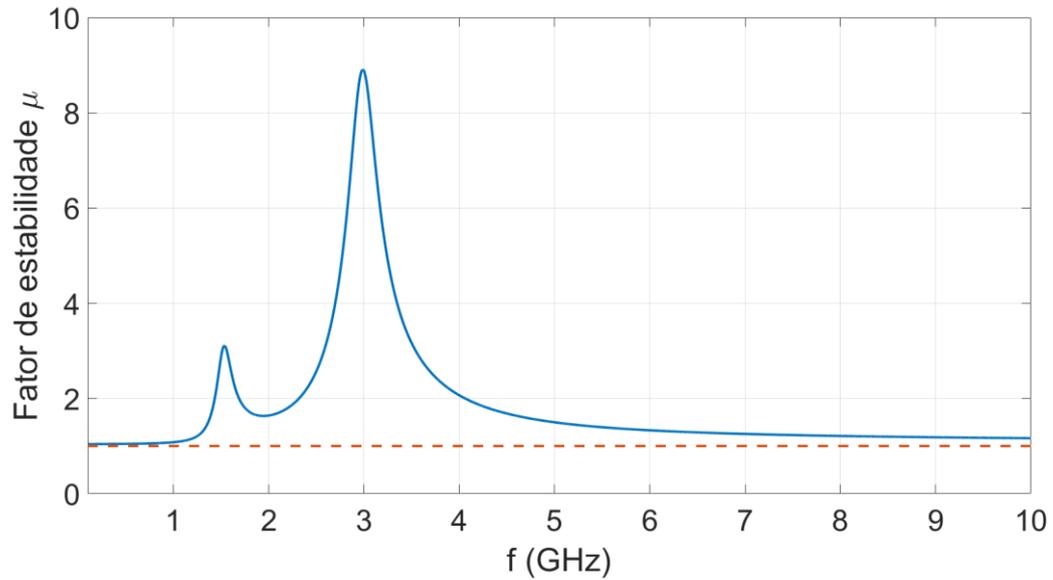
Todas as simulações foram realizadas pelo simulador Spectre no software Cadence Virtuoso, sendo que foram realizadas simulações de corrente contínua (dc), simulações de parâmetros de espalhamento (sp) para verificar o comportamento de pequenos sinais e simulações de equilíbrio harmônico (hb) para o comportamento de grandes sinais. O circuito foi testado com uma fonte diferencial de 2,45 GHz com impedância de entrada de 100 Ω , bem como uma carga diferencial também de 100 Ω .

4.1 RESULTADOS DO PA COMPLETO

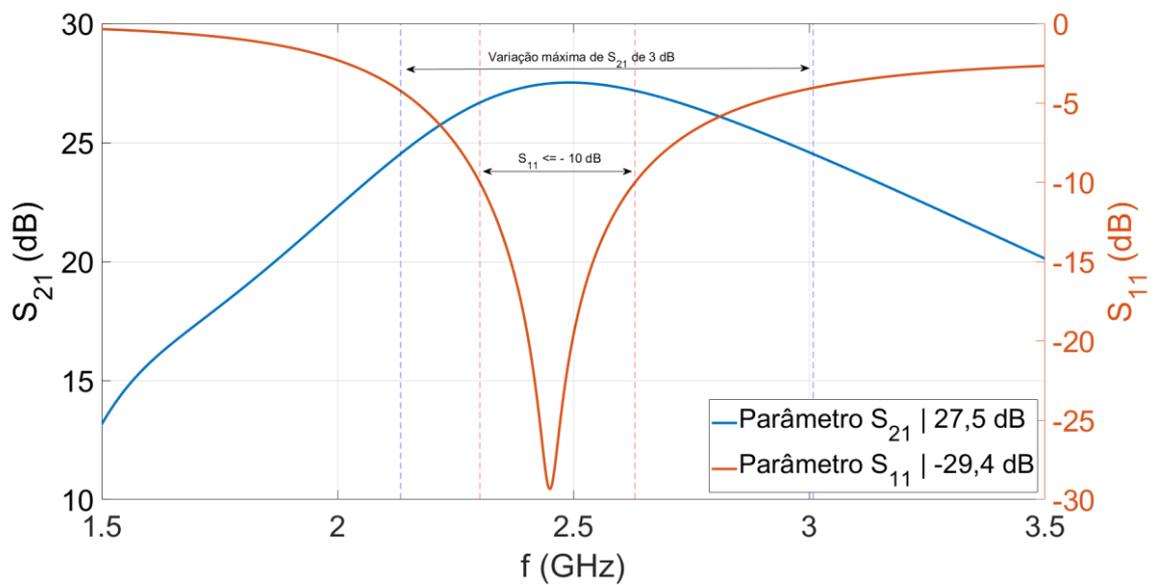
Para o amplificador completo, foram observadas as métricas do parâmetro de estabilidade μ e o parâmetros S_{11} e S_{21} a partir da simulação sp e as métricas do OCP_{1dB} , ganho direto e PAE a partir da simulação hb.

A FIGURA 22 apresenta o valor de μ para o PA proposto. Nota-se que, para a banda de frequências utilizadas, μ nunca assume valores inferiores a 1. Logo, conclui-se que o PA projetado é incondicionalmente estável.

A FIGURA 23 apresenta os parâmetros de espalhamento S_{11} e S_{21} , destacando os valores para a frequência de 2,45 GHz. Na frequência de operação, o parâmetro S_{11} apresenta o valor de aproximadamente -30 dB, indicando um ótimo casamento de impedância na entrada. Além disso, S_{11} mostra que o circuito apresentou um casamento de impedância de entrada bom (abaixo de -10 dB) para a faixa de frequências entre 2,3 GHz e 2,6 GHz. O parâmetro S_{21} , que representa o ganho direto do circuito, apresenta um valor de 27,5 dB na frequência de operação, conforme o estágio de ganho tinha sido projetado, pensando em um ganho direto superior a 25 dB. A variação máxima de 3 dB no ganho direto se deu na faixa de frequências entre 2,1 GHz e 3,0 GHz.

FIGURA 22 - PARÂMETRO DE ESTABILIDADE μ 

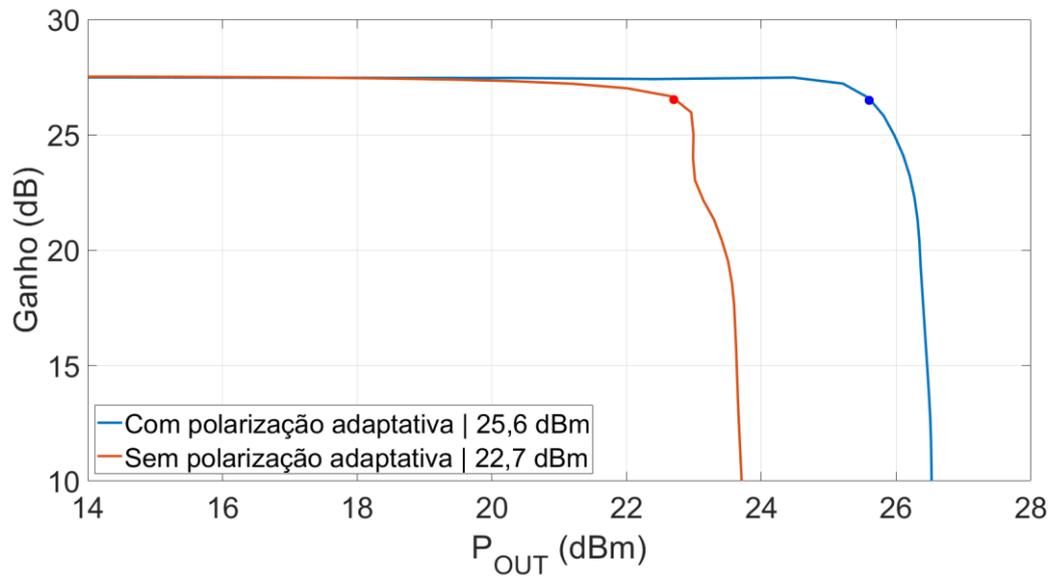
Fonte: O autor (2021).

FIGURA 23 - PARÂMETROS DE ESPALHAMENTO S_{11} E S_{21} 

Fonte: O autor (2021).

A FIGURA 24 apresenta o ganho de potência do circuito em duas situações diferentes: com os dois circuitos de polarização adaptativa desativados, ou seja, as células 1 e 2 do estágio de potência estão conectadas ao 0 V e com os circuitos de polarização adaptativa ativados. A FIGURA 25 apresenta a PAE para essas duas situações.

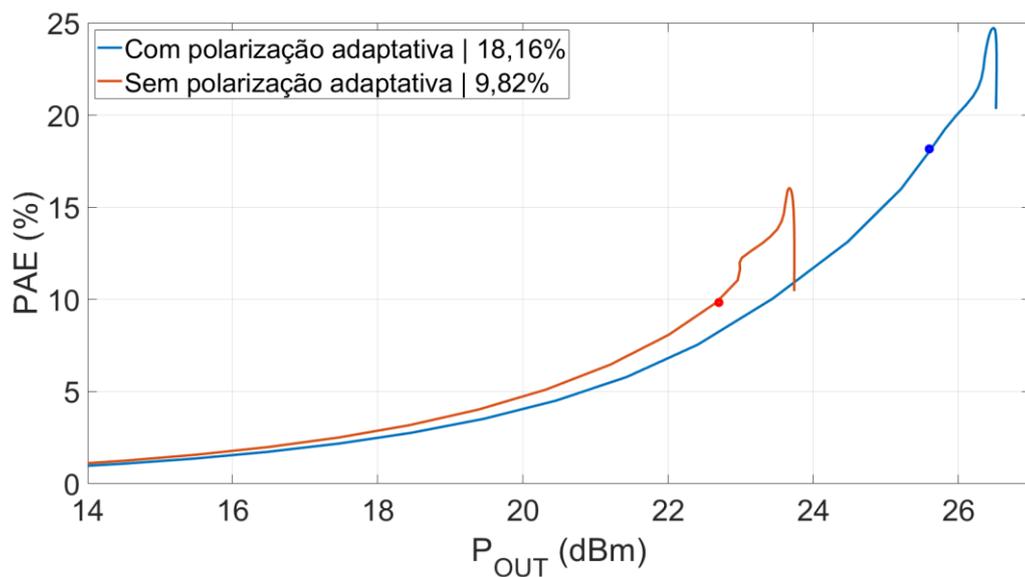
FIGURA 24 - GANHO DE POTÊNCIA EM FUNÇÃO DA POTÊNCIA DE SAÍDA



Fonte: O autor (2021).

LEGENDA: Gráfico com as curvas de ganho para o amplificador funcionando em três configurações diferentes em função da potência de saída, destacando os valores de OCP_{1dB} para cada modo de operação.

FIGURA 25 - PAE EM FUNÇÃO DA POTÊNCIA DE SAÍDA



Fonte: O autor (2021).

LEGENDA: Gráfico com as curvas da PAE para o amplificador funcionando com tensões de polarização diferentes no estágio de ganho em função da potência de saída, destacando os valores da PAE no OCP_{1dB} para cada modo de operação.

Nota-se novamente o bom funcionamento das células de polarização adaptativa, comparando os resultados de quando a nova polarização é utilizada e quando as células estão desativadas. Com a adição das células, foi possível melhorar o OCP_{1dB} em 3 dB em relação ao PA com as células desligadas, com o valor de 25,6 dBm estando dentro do esperado, visto que utilizando a mesma configuração no estágio de potência, o resultado obtido foi de 25,7 dBm. Para a PAE com polarização adaptativa, não se obteve um valor tão próximo a PAE máxima quanto para o estágio de potência, porém, uma eficiência de 18,16% ainda é um valor satisfatório considerando um PA com ganho direto de 27,5 dB.

4.2 COMPARAÇÃO COM O ESTADO DA ARTE

Para a comparação com o estado da arte, foram utilizados amplificadores multimodos de trabalhos anteriores e amplificadores com polarização adaptativa encontrados na literatura. A tabela comparando as métricas dos amplificadores está apresentada na TABELA 6, utilizando tanto resultados dos circuitos implementados fisicamente, de simulações pós leiaute e de simulações de esquemático, conforme o trabalho referenciado.

TABELA 5 - COMPARAÇÃO COM O ESTADO DA ARTE

Referência	Topologia	Arquitetura	Tecnologia (nm)	Ganho (dB)	OCP_{1dB} (dBm)	PAE @ OCP_{1dB} (%)
DOS SANTOS, 2015	Multimodo	Simple	CMOS 130	22,4 – 31,0	13,3 – 13,7	11,1 – 14,0
SANTOS, 2016 ¹	Multimodo	Simple	CMOS 130	13,5 – 21,1	6,0 – 18,2	2,4 – 16,5
TARUI, 2018 ²	Multimodo	Diferencial	CMOS 130	23,5 – 24,4	18,8 – 24,8	4,6 – 13,4
CHEN et al., 2006	Polarização adaptativa	Simple - Doherty	CMOS 180	10,6	21,4	33,0
LI et al., 2012 ²	Polarização adaptativa	Diferencial	BiCMOS 180	24,6	23,0	17,0
HO et al., 2014	Polarização adaptativa	Simple	CMOS 180	14,0	21,8	30,4
Esse trabalho²	Polarização adaptativa	Diferencial	CMOS 130	27,5	25,6	18,2

FONTE: O autor (2021).

LEGENDA: 1 – Resultados de simulação pós-leiaute; 2 – Resultados de simulação de esquemático,

Comparando os resultados deste trabalho com os demais amplificadores, o PA projetado neste trabalho apresentou os maiores valores de OCP_{1dB} . Isso é esperado devido a este trabalho tratar de um PA diferencial, que naturalmente possui uma excursão maior de potência que os PAs de saída simples. O circuito apresentou uma PAE inferior aos trabalhos de CHEN et al. (2006) e HO et al. (2014), mas nota-se que nesses trabalhos, a alta eficiência foi obtida com o custo de um ganho inferior. Além disso, o circuito proposto por CHEN et al. (2006) trata-se de um amplificador Doherty, que apresenta uma eficiência superior a arquitetura utilizada neste trabalho. Comparando com LI et. Al (2012), que apresenta um valor de ganho similar, esse trabalho foi superior em todas as métricas.

Em relação aos amplificadores multimodos, este trabalho foi capaz de melhorar todas as métricas em relação ao trabalho proposto por TARUI (2018), do qual o circuito do estágio de potência foi baseado utilizado no PA projetado foi baseado, mostrando a eficiência das células de polarização adaptativa, além de melhorias no projeto da rede de casamento de impedância na entrada.

O circuito também apresentou resultados de eficiência superiores a DOS SANTOS (2015) e SANTOS (2016), porém, esses dois circuitos foram testados utilizando medidas do circuito físico e através de simulações pós-leiaute, respectivamente. Pelo trabalho só ter sido testado no nível de esquemático, alguns dos valores apresentados podem decair considerando os efeitos parasitas provenientes do leiaute, principalmente nos valores de eficiência e OCP_{1dB} .

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com o objetivo de implementar uma técnica capaz de realizar a transição automática entre os modos de operação de um amplificador multimodo sem a necessidade de circuitos externos adicionais, foi proposta a implementação de um amplificador com estágio de potência multimodo conectado a células de polarização adaptativa, buscando melhorar a eficiência e a linearidade do amplificador.

Foi implementado um amplificador de potência funcional com células de polarização adaptativa, mostrando ser uma alternativa aos amplificadores de multimodo para melhorar a linearidade e a eficiência dos dispositivos quando operando em valores da potência de saída próximos a potência de saturação, com o amplificador obtendo um ganho direto de 27,5 dB, OCP_{1dB} de 25,6 dBm e PAE no OCP_{1dB} de 18,16%. Comparando esse trabalho com o estado da arte, nota-se que o PA desenvolvido apresentou o maior OCP_{1dB} , o que é justificado por ser um circuito diferencial, que apresenta uma excursão de sinal superior aos circuitos de saída simples. Em conjunto a essa métrica, este projeto também apresentou um dos maiores ganhos e valores da PAE satisfatórios.

Com o trabalho de conclusão de curso finalizado, foi possível obter um grande conhecimento no projeto de amplificadores de potência, principalmente em relação aos PAs multimodos e com polarização adaptativa. Também foi possível aprofundar os conhecimentos na tecnologia utilizada, conhecendo melhor os efeitos parasitas dos componentes e os limites de operação dos transistores.

5.1 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Nos trabalhos futuros, tem-se como principal objetivo a implementação do leiaute do esquemático desenvolvido, podendo analisar precisamente os efeitos parasitas provenientes da construção física do circuito, resultando em possíveis alterações no esquemático do circuito.

Além disso, é possível realizar a implementação do estágio de ganho como um amplificador de ganho programável, sendo possível alcançar um valor alto para OCP_{1dB} para um grande leque de valores de ganho, aumentando a aplicação do amplificador dentro de circuitos reais.

Por fim, deve-se realizar um estudo mais aprofundado na topologia utilizada para a célula de polarização adaptativa, buscando diminuir o consumo de potência, além de verificar se os valores utilizados são seguros para uma fabricação física, ou seja, se uma divergência nos valores dos componentes não resulta no não funcionamento do amplificador, através de uma análise estatística do circuito em função das variações do processo e temperatura.

REFERÊNCIAS

- CHEN, Y. J. E.; LIU, C. Y.; LUO, T. N.; HEO, D. A high-efficient CMOS RF power amplifier with automatic adaptive bias control. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, v. 16, n. 11, 2006.
- DOS SANTOS, E. L. Amplificador de potência CMOS de baixo consumo com controle de ganho. Universidade Federal do Paraná – UFPR. Dissertação de mestrado, 2015.
- DOS SANTOS, J.C.; TARUI, B. Y.; LEITE, B. Performance comparison between a multimode PA and a PA with adaptive biasing. *Seminários de Microeletrônica do Paraná (SeMicro-PR)*, 2020.
- HAN, J.; KIM, Y.; PARK, C.; LEE, D.; HONG, S. A CMOS power amplifier with an adaptive bias scheme for mobile radio frequency identification reader applications. *Microwave and Optical Technology Letters*, v. 49, n. 6, 2007.
- HO, J.; TSAO, H. W. A fully integrated 2.4GHz adaptive biased CMOS power amplifier for 802.11g WLAN application. *2014 Asia-Pacific Microwave Conference Proceedings, APMC 2014*, 2014.
- KOO, B.; NA, Y.; HONG, S. Integrated bias circuits of RF CMOS cascode power amplifier for linearity enhancement. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, v. 60, n. 2, 2012.
- LI, W.; TAN, Y. 2.4GHz power amplifier with adaptive bias circuit. *2012 International Conference on Systems and Informatics, ICSAI 2012*, 2012.
- LC Impedance matching network designer. Le Leivre, 2020. Disponível em: <https://www.leleivre.com/rf_lcmatch.html>. Acesso em: outubro de 2020.
- LUONG, G.; KERHERVE, E.; PHAM, J. M.; MEDREL, P. A 2.5-GHz Multimode Broadband Bias-Segmented Power Amplifier with Linearity-Efficiency Tradeoff. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, v. 28, n. 11, 2018.
- MUSIIGE, D. RF subsystem power consumption and induced radiation emulation. Technical University of Denmark. PHD, No. 304, 2013.
- NIKNEJAD, A. M. *Integrated Circuits for Communication (Lecture 1) – EECS 142*. University of California, 2005.
- REYNAERT, P.; STEYAERT, M. *RF Power Amplifiers for Mobile Communications*. Springer, 2006.
- SANTOS, F. G. Amplificador de potência CMOS em 2,4 GHz com potência de saída programável. Universidade Federal do Paraná – UFPR. Dissertação de mestrado, 2016.

TARUI, B. Y. Projeto e simulação de amplificador de potência multimodos em tecnologia CMOS 130 nm para operação na banda de frequência de 2,45 GHz. Universidade Federal do Paraná – UFPR. Trabalho de conclusão de curso, 2018.

