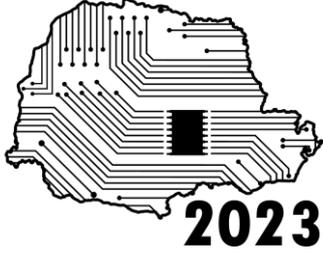


**SeMicro-PR**



# Projeto de amplificador de potência reconfigurável com indutância variável em tecnologia CMOS 130 nm

Enzo Coutinho<sup>1</sup>, Bernardo Leite<sup>1</sup>

<sup>1</sup> GICS, UFPR, Curitiba, Brasil  
enzo.coutinho@ufpr.br

**Resumo**—Esse artigo apresenta o projeto de um circuito de casamento de impedância de saída (OMC) variável, com indutância variável baseada em transformador integrado de radiofrequência. Ele foi utilizado na saída de um amplificador de potência (PA) multimodos projetado em CMOS 130 nm para a banda de 2,4 GHz. O OMC foi projetado com o objetivo de melhorar métricas de linearidade e eficiência em dois modos de operação do PA, o de maior potência (modo D) e o de menor potência (modo A). Utilizando o OMC pra o modo de maior potência o PA apresenta pontos de compressão de 1 dB (OCP1dB) de 20,7 dBm e 25,8 dBm para os modos de menor e maior potência respectivamente, e uma eficiência de potência adicionada (PAE) máxima de 12,2% e 21,3%. Usando o OMC com indutância variável, o novo valor de OCP1dB para o modo A foi de 21,5 dBm e a PAE máxima desse modo foi de 14,1%. Assim, através do projeto do OMC variável foi possível aumentar tanto a linearidade quanto a eficiência do modo de menor potência do amplificador.

## I. INTRODUÇÃO

O amplificador de potência (PA) é um dos circuitos mais importantes no *frontend* de radiofrequência (RF) de dispositivos de comunicação. Usado em circuitos de transmissão, possui o objetivo de adicionar potência a sinais que serão transmitidos pela antena, sem adicionar distorções excessivas à mensagem que será transmitida. Além da necessidade da linearidade, imposta pela maior parte dos protocolos de comunicação digitais modernos, o PA deve possuir um ganho de potência alto e eficiência alta, visto que ele é o circuito que consome a maior parte da potência DC no transmissor. [1]

A necessidade de PAs eficientes para diversos valores de potência de entrada levou à criação de amplificadores programáveis, com estágios que podem ser ativados ou desativados, de modo a criar perfis de eficiência melhores para uma gama maior de valores de potência de entrada. Projetos de amplificadores de potência programáveis podem ser vistos em [1] e [2]. A desvantagem desse tipo de circuito é que o casamento de impedância de saída é projetado normalmente para o modo de maior potência, e

não varia de acordo com o modo de operação do amplificador. Dessa forma, é interessante criar uma rede de casamento de impedância de saída que varie de acordo com o modo de operação do PA, de modo a maximizar suas características de potência em todos os casos. Uma solução para o projeto de indutâncias variáveis é proposta em [3], através da utilização de transformadores integrados de RF.

Transformadores são componentes utilizados em todo o tipo de aplicações relacionadas a engenharia elétrica, desde alta tensão até circuitos integrados de radiofrequência (RF). Em aplicações de RF, transformadores são muito utilizados, por terem um espectro bem grande de utilidades específicas, como divisão e combinação de potência, transformar barramentos de modo comum em diferenciais e casamentos de impedância. O projeto de circuitos em alta frequência apresenta dificuldades maiores se comparado com as outras aplicações de transformadores, visto que os elementos parasitas dos circuitos causam uma divergência entre os comportamentos esperados e os mostrados. Em alta frequência com componentes passivos concentrados ao invés de componentes distribuídos, pode-se alcançar uma diminuição significativa na área total ocupada pelos circuitos, visto que componentes distribuídos tem tamanhos dependentes da frequência. Além disso, com a evolução das tecnologias CMOS, ficou mais simples aplicar circuitos com várias camadas, que resultam numa diminuição grande de área. Transformadores podem se beneficiar muito desse tipo de tecnologia.

O objetivo desse artigo é descrever o projeto de um circuito de casamento de saída variável, através de uma indutância variável baseada em transformador. As indutâncias do transformador são associadas de formas diferentes para realizar o casamento de diversos modos de operação de um amplificador de potência CMOS, melhorando seu desempenho sem a necessidade de alterar seu núcleo de amplificação.

## II. INDUTÂNCIAS VARIÁVEIS

A solução para criar indutâncias variáveis ocupando uma área compacta proposta em [3] consiste em utilizar um único transformador e três chaves para criar até 6 indutâncias diferentes. Isso resulta de conectar os enrolamentos de maneiras diferentes, utilizando não só as indutâncias dos próprios enrolamentos, mas também a indutância mútua entre as estruturas, para diferenciar ainda mais as indutâncias que podem ser atingidas. A estrutura de conexão de acoplamento positiva proposta por [3] pode ser vista na Fig. 1.

Usando essa configuração, a indutância fornecida de cada um dos modos é função do fator de acoplamento entre os enrolamentos  $k$  e da relação entre as indutâncias do primário ( $L_p$ ) e secundário ( $L_s$ ).

## III. AMPLIFICADOR DE POTÊNCIA

O amplificador de potência multimodos utilizado no projeto foi o PA projetado por [1] e otimizado por [4]. O seu diagrama pode ser visto na Fig. 2. O amplificador foi projetado em tecnologia CMOS 130 nm para uma frequência de operação de 2,45 GHz. Trata-se de um PA com dois estágios, o estágio de ganho e o estágio de potência, com topologia cascode diferencial

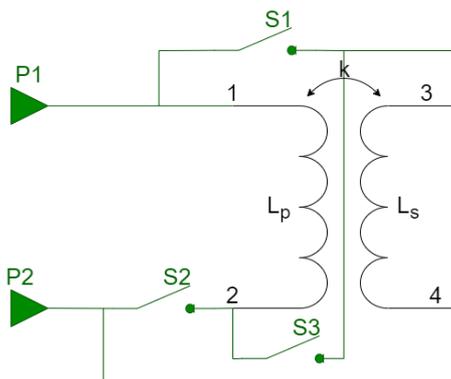


Fig. 1. Indutância variável baseada em transformador, com as indutâncias principais do transformador destacadas.

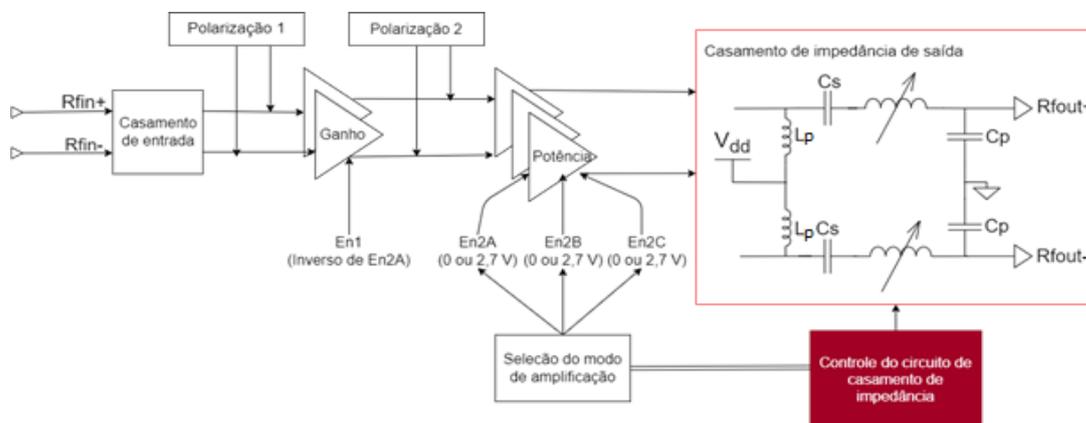


Fig. 2. Diagrama de blocos do amplificador de potência proposto.

A definição entre os modos de potência do amplificador é feita através das entradas En2A, En2B e En2C do estágio de potência e da entrada En1A do estágio de ganho. Cada uma destas entradas polariza um dos transistores de modo que, se todos eles estão no modo ativados, aumenta-se a potência de saída. Com mais transistores desativados, diminui-se a potência de saída, mas também a energia consumida pelo circuito. O OMC original usado pelo autor foi projetado para casar o modo de maior potência do amplificador, com todas as entradas ativadas, através de uma rede pi, com o primeiro indutor sendo usado como *choke*.

Em vermelho no diagrama da Fig. 2 estão explicitados os componentes do PA que projetados neste trabalho. Foi realizado o projeto de uma rede de casamento de impedância de saída variável que realiza o casamento de impedância simultâneo de dois modos de amplificação, através da variação apenas do componente indutivo do circuito, de modo a melhorar o OCP1dB dos dois modos simultaneamente.

## IV. PROJETO DA REDE DE CASAMENTO DE SAÍDA

Iniciou-se o projeto do circuito de casamento de impedância de saída pela simulação de *loadpull* do PA, de modo a maximizar o OCP1dB do amplificador. A Fig. 3 mostra as impedâncias de saída do amplificador que maximizam a sua linearidade, com os valores máximos de OCP1dB atingível de cada modo. Percebe-se que o modo A possui um desvio maior para a região capacitiva da carta de Smith, devido principalmente ao fato de que os MOSFETs com maior número de *fingers* estão no modo de corte, aumentando a capacitância conectada na saída do amplificador. Devido a isso, foi escolhido realizar o projeto de uma rede de casamento de impedância variável para casar simultaneamente os modos A e D do PA.

A rede de casamento de saída projetada está destacada em vermelho na Fig. 2. Ela foi projetada de modo que apenas a indutância tenha que variar para realizar o casamento dos dois modos, porém, devido a isso, o casamento para o modo A não ficou ideal com esses componentes. Os valores dos dispositivos passivos dessa

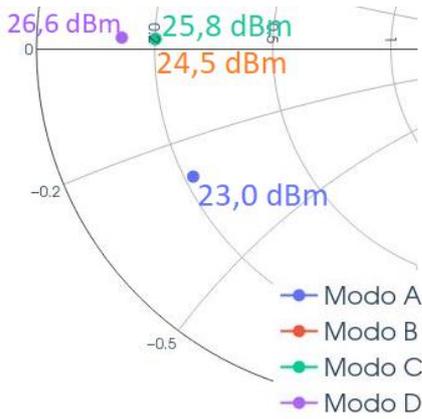


Fig. 3. Resultado da simulação de loadpull.

rede são  $C_s = 5,0$  pF,  $C_p = 3,3$  pF e  $L_p = 1,0$  nH. Para o modo A a indutância variável deve ter valor 1,3 nH e para o modo D, 2,0 nH.

Com os valores de indutância necessários é possível realizar o projeto do transformador. O transformador neste caso deve apresentar apenas dois valores de indutância. Desse modo, através das estruturas da Fig. 1 é possível atingir dois valores de indutância utilizando apenas uma chave, a chave 3, sendo que a chave 1 e 2 permanecem sempre abertas e fechada, respectivamente. Vale ressaltar que, nesse projeto foram utilizadas chaves ideais, que não oferecem resistências nem capacitâncias parasitas na indutância desejada. Além disso, não há efeitos de chaveamento durante a operação do amplificador, para evitar o efeito das distorções harmônicas que isso possa provocar. Nesse formato, a estrutura apresenta os valores de indutância de  $L_{primNC}$  e  $L_{primSC}$ , que podem ser determinados através das fórmulas [3]

$$L_{primNC} = L_p, \quad (1)$$

$$L_{primSC} = L_p \cdot (1 - k^2). \quad (2)$$

No modo PrimNC a indutância entre os terminais corresponde à indutância do enrolamento primário do transformador, dessa forma, ela deve ser projetada para ter o valor mais próximo possível do valor desejado de indutância, de 2,0 nH. A indutância no modo primSC é função da indutância do primário e do fator de acoplamento. Dessa forma, o enrolamento secundário do transformador deve ser projetado para atingir o fator de

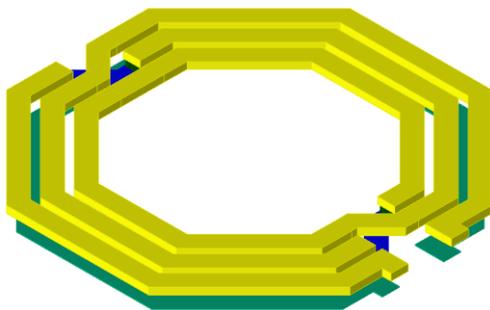


Fig. 4. Leiante do transformador projetado.

acoplamento desejado para que  $L_{primSC}$  fique próximo do valor desejado de indutância, de 1,3 nH.

O transformador desejado pode ser visto na Fig. 4, com o enrolamento primário em amarelo, em cima, e o enrolamento secundário em verde, em baixo. O projeto do primário foi realizado através de simulações paramétricas alterando suas características geométricas: número de voltas, o espaçamento entre as trilhas, a dimensão exterior do transformador ( $D$ ) e a largura das trilhas ( $w$ ), tomando cuidado para mantê-la acima do valor mínimo imposto pela tecnologia, devido aos níveis de corrente elétrica no PA. Para o projeto do secundário, como sua indutância característica não influenciava na indutância final  $L_{primSC}$ , ele foi projetado de modo a atingir o fator de acoplamento desejado de 0,64, que iria fazer com que  $L_{primSC}$  fosse aproximadamente 1,3 nH. Dessa forma, ele foi mantido com apenas uma volta e variou-se  $D$ ,  $w$ , a camada e metal na qual o enrolamento é implementado e sua disposição em relação ao primário.

No transformador projetado, foi realizada uma simulação eletromagnética para verificar se ele apresenta os valores desejados de indutância. Em 2,45 GHz o transformador apresenta uma indutância  $L_{primNC}$  de 2,04 nH e uma indutância  $L_{primSC}$  de 1,26 nH, com um fator de acoplamento de 0,63. O transformador final possui uma  $D$  de 200  $\mu\text{m}$ , com  $w$  no primário de 10  $\mu\text{m}$  e  $w$  do secundário de 13,5  $\mu\text{m}$ .

## V. RESULTADOS

Com o transformador projetado, foi realizada a simulação do amplificador de potência com o circuito de casamento de impedância variável projetado. A Fig. 5 mostra a curva de Potência de saída ( $P_{out}$ ) em função da potência de entrada ( $P_{in}$ ) do amplificador em dBm, com o indutor na configuração PrimNC e PrimSC, respectivamente para o modo A. A Fig. 6 apresenta a curva de eficiência de potência adicionada (PAE) do amplificador de potência, para o modo A com o indutor em PrimNC, modo A com o indutor em PrimSC e modo D.

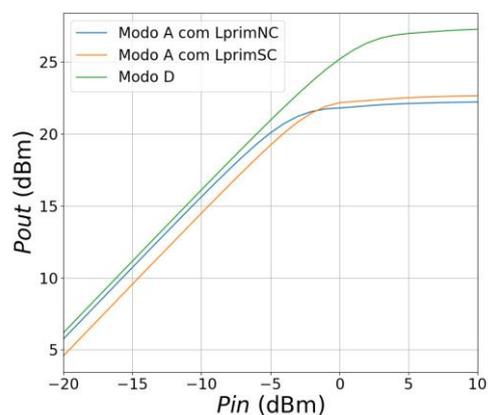


Fig. 5.  $P_{out}$  (dBm) versus  $P_{in}$  (dBm), para cada um dos modos e indutâncias.

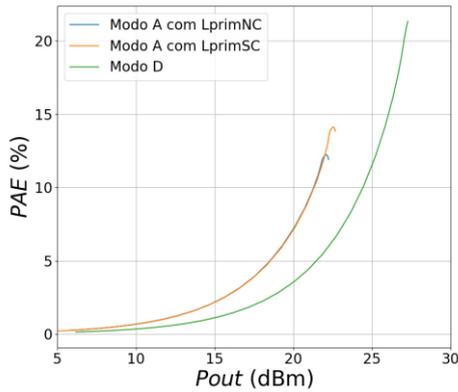


Fig. 6. PAE (%) versus  $P_{in}$  (dBm), para cada um dos modos e indutâncias.

O modo D atinge o valor máximo de linearidade com o indutor em PrimNC, com OCP1dB de 25,8 dBm e o modo A atinge o valor máximo de OCP1dB de 21,5 dBm com o indutor em PrimSC. Caso tivesse sido utilizada uma indutância fixa, dimensionada para o modo D, o modo A atingiria um ponto de compressão de apenas 20,7 dBm. Ou seja, através da utilização de um circuito de casamento de impedância variável foi possível aumentar o OCP1dB de um dos modos em aproximadamente 0,8 dB.

Pela curva de PAE também é possível perceber que houve uma melhora da eficiência do modo A do amplificador com o casamento de impedância variável. A PAE se mantém similar em potências mais baixas, mas consegue atingir valores mais altos, devido à maior potência de saturação do amplificador. A tabela I mostra um comparativo entre os valores que foram atingidos pelo trabalho.

TABELA I: TABELA COMPARATIVA DAS MÉTRICAS DO PA

	Modo A (LprimNC)	Modo A (LprimSC)	Modo D
OCP1dB (dBm)	20,7	21,5	25,8
PAE @ OCP1dB (%)	8,6	10,4	14,2
PAE max (%)	12,2	14,1	21,3

## VI. CONCLUSÃO

Utilizando o OMC pra o modo de maior potência o PA apresenta OCP1dB de 20,7 dBm e 25,8 dBm para os

modos de menor e maior potência respectivamente, e uma eficiência de potência adicionada (PAE) máxima de 12,2% e 21,3%. Usando o OMC com indutância variável, o novo valor de OCP1dB para o modo A foi de 21,5 dBm e a PAE máxima desse modo foi de 14,1%.

Esse trabalho apresenta um circuito de casamento de impedância variável usado para casar dois modos de um amplificador programável diferencial. Através da aplicação desse circuito, foi possível atingir valores melhores para linearidade e eficiência do PA em comparação com o que seria obtido com uma rede de casamento de impedância fixa. Isso pode ser verificado através das curvas do modo D e do modo A com a indutância LprimNC, em comparação com a curva do modo A com LprimSC. Esse circuito foi implementado através da variação de um único elemento, o indutor, e as diversas indutâncias fornecidas por ele foram atingidas através do projeto de um transformador integrado, que, em conjunto com uma chave ideal, consegue prover diferentes valores de indutância entre seus terminais de entrada.

A aplicação do circuito desenvolvido irá depender principalmente da topologia do amplificador de potência multimodos. Amplificadores que dependem da desativação de estágios com MOSFETs dimensionalmente grandes podem fazer com que a impedância de saída ótima dos modos de maior potência tenham um desvio para a parte capacitiva da carta de Smith, e nesses casos, o circuito de casamento de impedância adaptativo apresenta uma vantagem significativa.

## AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer o apoio do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico (CNPq).

## REFERÊNCIAS

- [1] TARUI, B. "Projeto e simulação de amplificador de potência multimodos de alta potência e baixa variação de ganho". UFPR, 2021.
- [2] DOS SANTOS, Leonardo; LEITE, B. "Amplificador de potência CMOS de baixo consumo com controle de ganho". UFPR, 2015.
- [3] SILVA, Rodrigo G.; LEITE, B. "Transformer-Based variable inductance applied to a CMOS voltage-controlled oscillator". UFPR, 2021.
- [4] QUADROS, M.; TARUI, B.; LEITE, B. "Stability and Linearity Improvement in a Multi-Mode CMOS Power Amplifier". SForum, 2023.