

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
SETOR DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

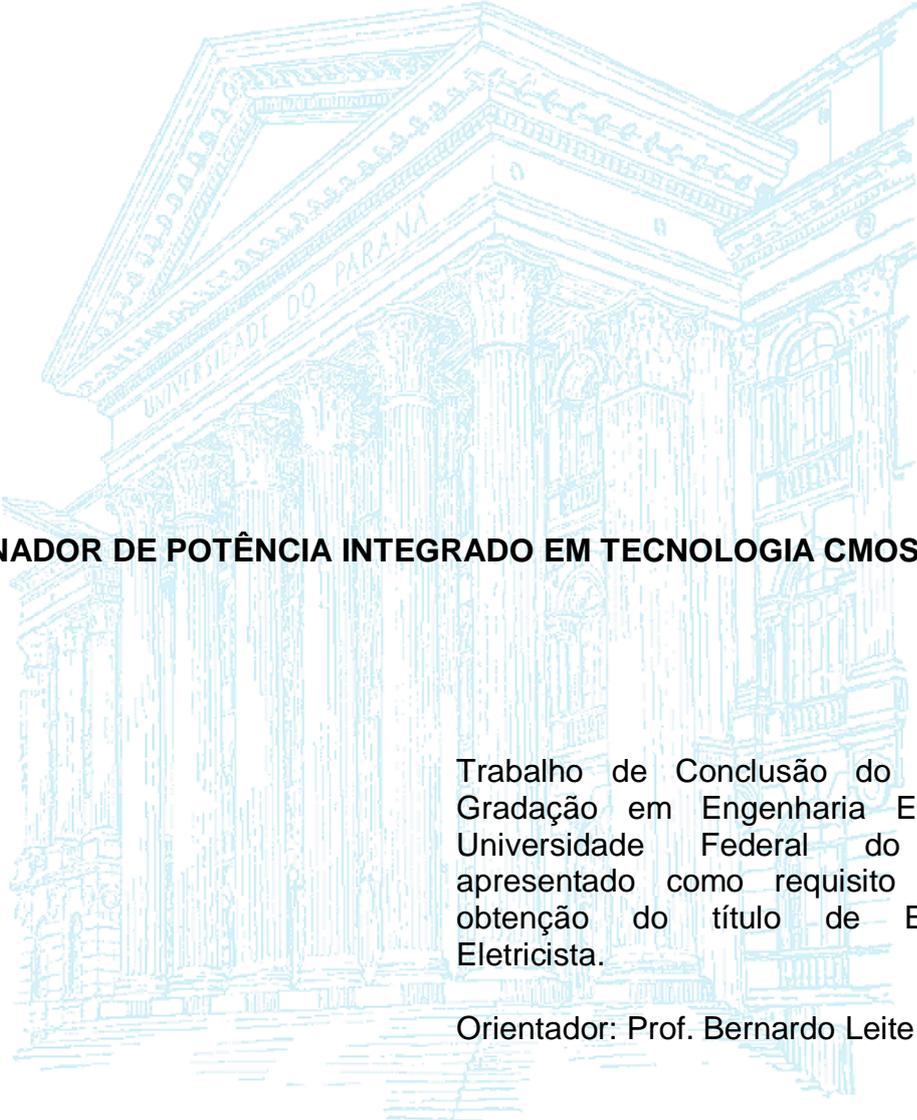
JOÃO PAULO PERBICHE

COMBINADOR DE POTÊNCIA INTEGRADO EM TECNOLOGIA CMOS 130 NM

CURITIBA

2017

JOÃO PAULO PERBICHE



COMBINADOR DE POTÊNCIA INTEGRADO EM TECNOLOGIA CMOS 130 NM

Trabalho de Conclusão do Curso de Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Paraná, apresentado como requisito parcial à obtenção do título de Engenheiro Eletricista.

Orientador: Prof. Bernardo Leite

CURITIBA

2017

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a infraestrutura do GICS e do Departamento de Engenharia Elétrica, bem como a todos os Professores e servidores pelo suporte e apoio.

Um agradecimento em especial ao Professor e orientador deste trabalho, Bernardo Leite, com muito zelo e dedicação orientou de forma ímpar na condução desta pesquisa.

Agradeço a todos os colegas que contribuíram direta ou indiretamente para minha formação acadêmica e crescimento pessoal.

Um reconhecimento especial é para aqueles que estão mais próximos, a família, com apoio e carinho também contribuíram de forma positiva para a formação acadêmica.

RESUMO

A aplicação essencial de um combinador de potência consiste em associar amplificadores de potência (PAs) com o intuito de propiciar uma potência de saída superior a potencia inicial dos amplificadores. O presente trabalho consiste no desenvolvimento de um combinador de potência, para um PA com operação em 2,4GHz, projetados em tecnologia CMOS 130 nm. Um combinador de potência de quatro entradas pode associar quatros PAs, visando um aumento de potência de saída de até 4 vezes a potência de entrada. A fase inicial do projeto tem o objetivo de configurar a simulação de PAs com combinadores. Essa configuração foi implementada com a ferramenta Virtuoso da Cadence, utilizando como elementos principais, amplificadores de potência e combinadores pré-projetados. Nesta configuração os amplificadores foram conectados em paralelo e os combinadores associados em série. A segunda etapa do trabalho tem como foco o projeto de um combinador de quatro entradas, utilizando a plataforma Advanced Design System (ADS). A principal métrica de avaliação dos combinadores será a menor perda de inserção (ILm) em 2,4 GHz, extraída da simulação eletromagnética com o método dos elementos finitos (FEM). Selecionado o combinador com a menor ILm, será exportado para a configuração de simulação realizada na primeira etapa do projeto para avaliá-lo. O combinador foi projetado para associar 4 PAs em paralelo, e teve como melhor resultado um ILm de 1,78 dB. O valor de OCP_{1dB} para o PA diferencial sem associação foi de 23,4 dBm, a combinação de 4 PAs obteve OCP_{1dB} de 27,8 dBm, representando 795 mW de potência de saída. A eficiência do PA foi de 27,8 % e com a associação utilizando este combinador, resultou em uma eficiência de 23,8 %.

Palavras-chave: Combinador de potência, amplificador de potência, transformadores integrados, CMOS 130 nm, radiofrequência.

ABSTRACT

A power combiner intrinsic nature is to incorporate a variety of power amplifiers (PAs) in order to increase its power output. This work designs a power combiner for a PA at 2.4 GHz frequency using 130nm CMOS technology. A four-way power combiner can associate four PAs and reaches a power output up to four times its input. The project's initial phase aims to configure a simulation for the PAs with combiners. This arrangement is implemented with Cadence's tool Virtuoso and its core elements are power amplifiers and precast combiners. In this configuration, the amplifiers are connected in parallel and the combiners in series. This work next stage designs a four-way power combiner employing the Advanced Design System (ADS) platform. The combiner's main evaluation is the insertion loss minimum value (ILm) at 2.4 GHz, acquired with the finite element method (FEM) for electromagnetic simulation. The one with the smallest ILm is exported for the simulation configured at the first phase for its assessment. The combiner was designed to combiner 4 PAs in parallel, with an ILm of 1.78 dB. The OCP_{1dB} value for the differential PA of 23.4 dBm, the combination of 4 PAs achieved OCP_{1dB} of 27.8 dBm, which is the equivalent of a 795 mW power output.. The efficiency of the one PA was 27.8% and with the combination, resulted in an efficiency of 23.8%.

Keywords: Power combiner, power amplifier, integrated transformers, CMOS 130nm, radiofrequency.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 1 – CIRCUITO SIMPLIFICADO DE UM TRANSMISSOR EM RADIOFREQUÊNCIA.....	11
FIGURA 2 - MODELO ELÉTRICO EQUIVALENTE DE UM TRANSFORMADOR	15
FIGURA 3 - MODELO IDEAL DE UM TRANSFORMADOR	15
FIGURA 4 - TIPOS DE ACOPLAMENTO MAGNÉTICO	18
FIGURA 5 - TIPOS DE ENROLAMENTO :	19
FIGURA 6 - COMBINAÇÃO DE POTÊNCIA COM COMBINADORES EM PARALELO	20
FIGURA 7 - COMBINADORES COM ASSOCIAÇÃO EM SÉRIE	21
FIGURA 8 - COMBINADOR DE POTENCIA COM TOPOLOGIA OCTOGONAL COM ROTAÇÃO.....	22
FIGURA 9 - PONTO DE COMPRESSÃO DE 1 dB	22
FIGURA 10 - POTÊNCIAS DO PA.....	23
FIGURA 11 – ETAPAS DA METODOLOGIA DO TRABALHO.....	24
FIGURA 12 - TRANSFORMADOR ESCOLHIDO PARA CONSTITUIR O COMBINADOR.....	25
FIGURA 13 - DIMENSÕES FÍSICAS DO TRANSFORMADOR	26
FIGURA 14 - COMBINADOR DE 2 ENTRADAS.....	29
FIGURA 15 - COMBINADOR DE 4 ENTRADAS COM <i>LAYOUT</i> QUADRANGULAR	30
FIGURA 16 – 4 COMBINADOR EM FILEIRA	31
FIGURA 17 - PA PRÉ - PROJETADO.....	32
FIGURA 18 - PA DIFERENCIAL	33
Figura 19 - CONFIGURAÇÃO DE SIMULAÇÃO INICIAL	34
FIGURA 20 - ASSOCIAÇÃO DE 2 PAs COM COMBINADORES IDEAIS	35
FIGURA 21 - CIRCUITO DE CASAMENTO DE IMPEDÂNCIAS	36
FIGURA 22 - COMBINAÇÃO DE POTÊNCIA COM CASAMENTO DE IMPEDÂNCIAS.....	36
FIGURA 23 - ASSOCIAÇÃO DE 4 PAs COM 2 COMBINADORES	39
FIGURA 24 - ASSOCIAÇÃO DE 4 PAs COM 1 COMBINADOR.....	42
FIGURA 25 - RECONFIGURAÇÃO DOS PAs	42

FIGURA 26 - SIMULAÇÃO DA EFICIÊNCIA PARA PAs RECONFIGURÁVEIS.....	43
FIGURA 27 - VARIAÇÃO DE OCP_{1dB} PARA PAs RECONFIGURÁVIES	43

LISTA DE GRÁFICOS

GRÁFICO 1 - FATOR DE QUALIDADE E INDUTÂNCIA DO ENROLAMENTO PRIMÁRIO.....	26
GRÁFICO 2 - FATOR DE QUALIDADE E INDUTÂNCIA DO ENROLAMENTO SECUNDÁRIO	27
GRÁFICO 3 - ACOPLAMENTO MAGNÉTICO	28
GRÁFICO 4 - MÍNIMA PERDA DE INSERÇÃO DO TRANSFORMADOR UTILIZADO NO COMBINADOR	28
GRÁFICO 5 - IL_m PARA COMBINADOR NO FORMATO DE UMA MATRIZ 2X2	30
GRÁFICO 6 - IL_m PARA COMBINADOR NO FORMATO DE UMA MATRIZ 4X1	31
GRÁFICO 7 - CURVA DE AMPLIFICAÇÃO DE UM PA SEM ASSOCIAÇÃO	34
GRÁFICO 8 - COMBINAÇÃO IDEAL DE 2 AMPLIFICADORES.....	35
GRÁFICO 9 - CURVA DE AMPLIFICAÇÃO PARA COMBINAÇÃO DE POTÊNCIA COM COMBINADOR NÃO IDEAL	37
GRÁFICO 10 - PAE X POUT PARA COMBINADOR DE 2 ENTRADAS.....	38
GRÁFICO 11 - VARIAÇÃO DE OCP_{1dB} PARA COMBINADOR DE 2 ENTRADAS ...	38
GRÁFICO 12 - CURVA DE AMPLIFICAÇÃO PARA COMBINAÇÃO DE 4 AMPLIFICADORES COM COMBINADOR NÃO IDEAL.....	39
GRÁFICO 13 - PAE X POUT PARA COMBINADOR DE 4 ENTRADAS.....	40
GRÁFICO 14 - VARIAÇÃO DE OCP_{1dB} PARA COMBINADOR DE 4 ENTRADAS ...	40
GRÁFICO 15 - POTÊNCIA DE SAÍDA	41

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

PA – Amplificador de potência

CMOS – Semicondutor de metal-óxido complementar

ILm – Perda mínima de inserção

OCP_{1dB} – Ponto de compressão de 1 dB

WLAN – Rede de área local sem fio

FEM – Método dos elementos finitos

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	11
1.1 MOTIVAÇÃO	11
1.2 OBJETIVOS	12
1.2.1 Objetivo Geral	12
1.2.2 Objetivos Específicos.....	12
1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	13
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
2.1 TRANSFORMADORES	14
2.2 COMBINADORES DE POTÊNCIA	19
2.3 MÉTRICAS DOS PAs.....	22
2.3.1 Ponto de compressão de 1dB	22
2.3.2 Eficiência.....	23
3 METODOLOGIA	24
3.1 SIMULAÇÃO ELETROMAGNÉTICA.....	24
3.2 ESTUDO DO TRANSFORMADOR	25
3.3 COMBINADOR DE POTÊNCIA DE 2 ENTRADAS	28
3.4 COMBINADOR DE POTÊNCIA DE 4 ENTRADAS	29
3.5 PA PRÉ-PROJETADO	32
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	34
4.1 CONFIGURAÇÃO DE SIMULAÇÃO	34
4.2 SIMULAÇÃO DO COMBINADOR DE 4 ENTRADAS	39
4.3 PAs RECONFIGURÁVEIS	42
5. CONCLUSÃO	44
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	45

1. INTRODUÇÃO

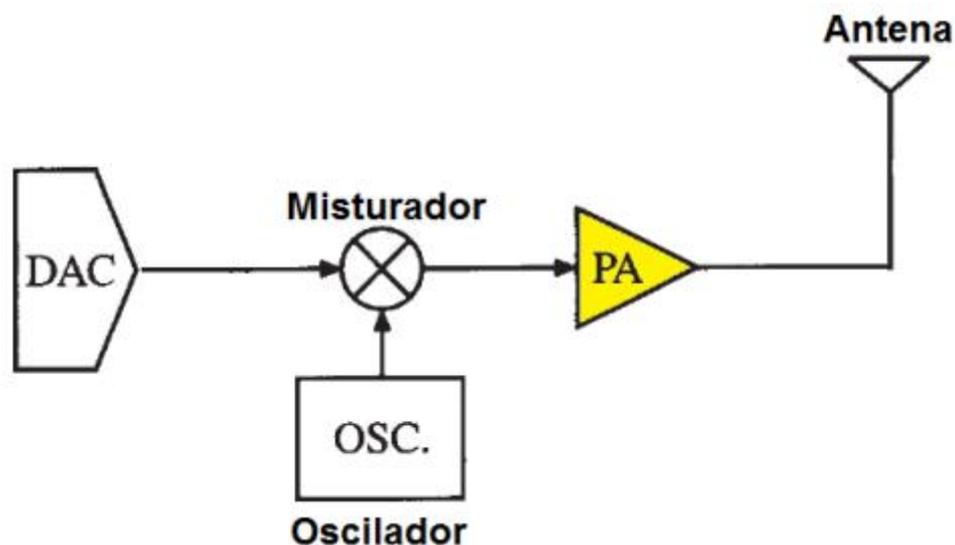
1.1 MOTIVAÇÃO

Consoante a CISCO(2016) somente no ano de 2016 foram adquiridos aproximadamente 430 milhões de dispositivos móveis. A constante evolução de dispositivos que acessam redes móveis e novos dispositivos surgindo com a expansão da Internet das Coisas (IoT), são os principais motivos que contribuíram para o crescimento global do tráfego móvel (CISCO, 2016). Com o aumento do tráfego de informações, são necessários equipamentos periféricos capazes de processar e transmitir essa informação de forma rápida e eficiente.

Esses novos usuários conectam-se em ambientes de redes sem fio, constituindo uma rede com alta densidade de usuários (ASHRAF, H., 2017). Essas redes usam como padrão de comunicação o IEEE 802.11 (ASHRAF, H., 2017), protocolo usado em redes de área local sem fio (WLANs). Para não haver um congestionamento e para que toda informação possa ser transmitida e recebida com segurança e eficiência, são necessárias modificações sistêmicas, tais como o uso de métodos de modulação mais complexos. Tais modulações, entretanto, aumentam a exigência de linearidade da potência de saída de amplificadores de potência (PAs).

Em uma arquitetura de transmissão de sinal de radiofrequência (RF), como ilustrado na FIGURA 1, o PA exerce um papel vital no sistema de comunicação, posicionado no fim da arquitetura.

FIGURA 1 – CIRCUITO SIMPLIFICADO DE UM TRANSMISSOR EM RADIOFREQUÊNCIA



FONTE: ADAPTADO DE LUDWIG & BRETCHKO (2000).

Para que o PA possa fornecer níveis de potência de saída superiores ao limite imposto pelos transistores, é utilizada a técnica de combinação de potência (ZHAO, D., 2013), que será o foco desta pesquisa.

Esta técnica admite ser reconfigurável, conforme a quantidade da taxa de dados transmitidos ou conforme a distância. Assim, os PAs podem ser chaveados para um modo de baixo consumo quando a taxa de transmissão for baixa e/ou o alcance da transmissão for para distâncias curtas (PYE, D., 2011). Esta técnica possui também como vantagem a capacidade de ampliar a eficiência do sistema espectral, suportando mais dispositivos conectados simultaneamente, podendo suprir o crescente aumento pela demanda de rede sem fio.

Com a capacidade cada vez maior da integração de componentes em tecnologia CMOS, acarretando baixo custo e uma maior confiabilidade do sistema, o interesse nessa tecnologia é crescente. Normalmente os PAs são confeccionados em CMOS e separados do restante de outros componentes de um transceptor, reduzindo os custos.

A combinação de potência supera a potência pré-definida pelo projeto inicial de um PA, podendo se adaptar conforme a necessidade da carga instalada.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

O tema de pesquisa pretende contribuir para a área de projetos de circuitos integrados de radiofrequência, com foco na otimização de amplificadores de potência a partir da técnica de combinação de potência. Um combinador de quatro entradas baseado em transformadores é proposto para combinar a potência de saída de quatro PAs. O combinador foi projetado para uma operação na frequência de 2,4 GHz, e integrado em tecnologia CMOS 130 nm. Entre as diversas possíveis aplicações, podem-se citar as redes de comunicação sem fio, como as WLANs.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Projetar e validar uma configuração de teste.
- Projetar e simular os combinadores de potência, com validação por simulação eletromagnética com método dos elementos finitos.

- Estudar as técnicas para diminuir a métrica de mínima perda de inserção (ILm), bem como aplicá-las.
- Simular o combinador projetado com quatro PAs diferenciais, obtendo uma máxima potência de saída a partir de um perfeito casamento de impedâncias.

1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

O primeiro capítulo deste documento introduz o problema e o contexto da abordagem desta pesquisa, assim como os objetivos a serem alcançados. No segundo capítulo tem-se um levantamento bibliográfico abordando os principais conceitos utilizados para o projeto do combinador de potência. O terceiro capítulo contém a metodologia adotada para o desenvolvimento do projeto, caracterizando um capítulo técnico. No capítulo seguinte, quarto, são apresentados e discutidos os resultados obtidos. Finalizando, o quinto capítulo expõe a conclusão, bem como sugere melhorias para continuação do trabalho.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

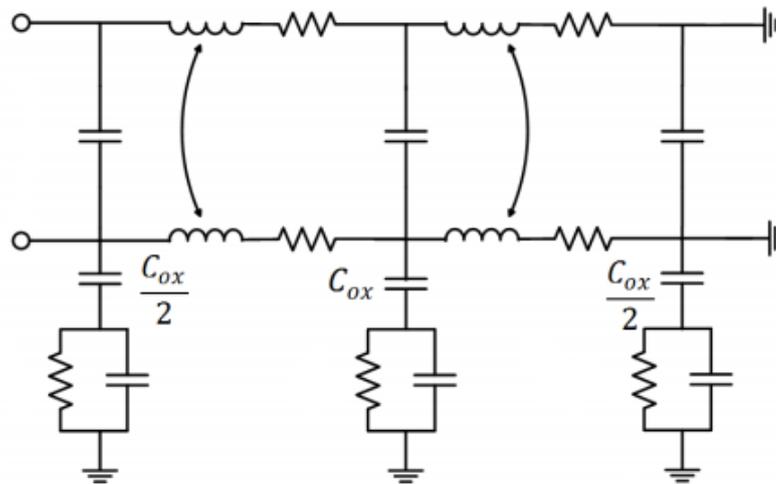
Buscando as principais técnicas que combinem os PAs para fornecer um maior nível de potência de saída. Nesta sustentação teórica estão as principais técnicas no projeto dos transformadores e combinadores, bem como suas principais métricas e também as métricas de avaliação dos PAs.

2.1 TRANSFORMADORES

Historicamente, os transformadores foram mais amplamente utilizados em sistemas de energia, com objetivo de aumentar a tensão e de diminuir as perdas na transmissão de longo alcance da energia elétrica. Mas os transformadores também acabam tendo um papel fundamental em aplicações de RF (MOISIADIS, Y., 2017), como em aplicações de baixo ruído (medições sensíveis), para realizar realimentação de sinal com baixa perda (MOISIADIS, Y., 2017), para gerar uma tensão na carga isolada da rede de alimentação. Os transformadores também possuem a característica de realizar a combinação ou a divisão de potência em amplificadores de potência, sendo o foco desta pesquisa.

Os transformadores são elementos passivos construídos a partir da combinação de no mínimo duas bobinas, referenciadas como primário e secundário. Para poder parametrizar o transformador é necessário um modelo elétrico equivalente (LEITE, B., 2011). Para isso, normalmente é utilizado um modelo elétrico não ideal, ou seja, é considerada no modelo a resistência elétrica dos enrolamentos do transformador. Além das resistências, também são consideradas capacitâncias que são responsáveis pela ressonância do transformador. Com a FIGURA 2 pode-se observar um exemplo gráfico desse modelo equivalente, no qual estão representados os elementos parasitas. A partir deste modelo equivalente são constituídas as grandezas físicas imprescindíveis para o projeto de um transformador. Tais grandezas utilizam na sua formulação os parâmetros de impedância (MOISIADIS, Y., 2017), que são extraídos a partir da simulação eletromagnética, realizada com o programa computacional ADS.

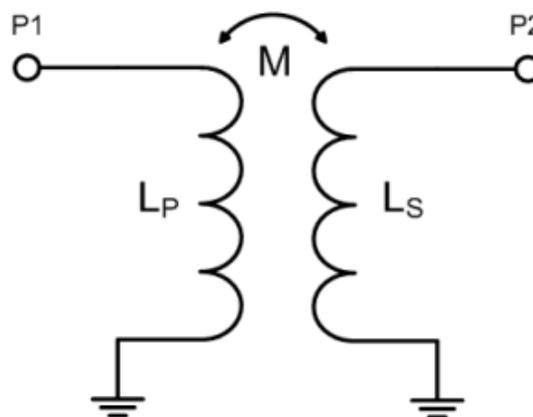
FIGURA 2 - MODELO ELÉTRICO EQUIVALENTE DE UM TRANSFORMADOR



FONTE: ADAPTADO DE LEITE (2011).

Existem vários modelos de transformadores, como por exemplo, modelo π , modelo em 'T', modelo compacto, entre outros. Há também o modelo ideal de duas portas, como representado na FIGURA 3, sem a representação de resistências e capacitâncias parasitas.

FIGURA 3 - MODELO IDEAL DE DUAS PORTAS DE UM TRANSFORMADOR



FONTE: LEITE (2011).

Os indutores que compõem o transformador são formados por N enrolamentos cada um, e são caracterizados pela grandeza física denominada indutância. É possível a extração da indutância equivalente primária e secundária do transformador, a partir das equações (1) e (2), respectivamente (LEITE, B., 2011). Para a formulação da indutância se faz necessária a utilização da parte imaginária da impedância, representada por " $\text{Im}(Z_{11})$ " e " $\text{Im}(Z_{22})$ ", para impedâncias da bobina primária e secundária, respectivamente. Elas são determinadas pela geometria do indutor, além de outros parâmetros, como a quantidade de enrolamentos e o

diâmetro externo. O valor da indutância está diretamente relacionado ao número de espiras e a seu diâmetro, e inversamente a largura da trilha que compõe as bobinas.

$$L_{\text{prim}} = \frac{\text{Im}(Z_{11})}{2\pi f} \quad (1),$$

$$L_{\text{sec}} = \frac{\text{Im}(Z_{22})}{2\pi f} \quad (2).$$

Quando duas bobinas estão próximas uma da outra, ocorre uma influência da corrente que circula em uma bobina pela corrente da outra, conhecido como fluxo magnético. Esse fenômeno é conhecido como indutância mútua e pode ser caracterizado pela equação (3). Se as correntes estiverem com sentido antagônico ($\pm 180^\circ$) entre elas, a indutância mútua será negativamente adicionada em cada autoindutância (PAK, J. S, 2010). Caso as correntes estejam no mesmo sentido, a indutância mútua será positivamente adicionada.

$$M = \pm \frac{\text{Im}(Z_{12})}{2\pi f} \quad (3).$$

O acoplamento magnético também é resultado desse fluxo magnético decorrente de bobinas próximas. Este parâmetro pode ser mensurado a partir do valor da indutância mútua, primária e secundária, como representado na equação (4). O acoplamento magnético admite valores entre 0 e 1, representando respectivamente acoplamento nulo e acoplamento perfeito.

$$k = \frac{M}{\sqrt{L_{\text{prim}} * L_{\text{sec}}}} \quad (4).$$

Uma métrica extremamente relevante é o fator de qualidade Q das bobinas que constituem o transformador. Como a indutância, o fator Q também está diretamente relacionado com a geometria das bobinas (NIKNEJAD, A., 2007), bem como outras características físicas dos enrolamentos. Essas características físicas são responsáveis pela introdução de resistência no transformador, diminuindo seu fator Q. Como está representado na equação (5) e (6) o fator Q é representado pela razão entre energia armazenada ($\text{Im}(Z_{xx})$) e a dissipada pelas resistências parasitas ($\text{Re}(Z_{xx})$).

$$Q_{\text{prim}} = \frac{\text{Im}(Z_{11})}{\text{Re}(Z_{11})} \quad (5),$$

$$Q_{\text{sec}} = \frac{\text{Im}(Z_{22})}{\text{Re}(Z_{22})} \quad (6).$$

Principalmente em indutores integrados, os aspectos mais importantes são, área de silício e o fator de qualidade para aplicações em RF (VANUKURU, V., 2015).

Um fator que influencia consideravelmente no fator Q, são trilhas estreitas aumentando a resistência da bobina (VANUKURU, V., 2015). Outro aspecto do *layout* de indutores e transformadores é o tipo de metal utilizado nas trilhas, quanto mais alto for o metal, menor será o acoplamento capacitivo com o substrato, resultando em um melhor fator de qualidade.

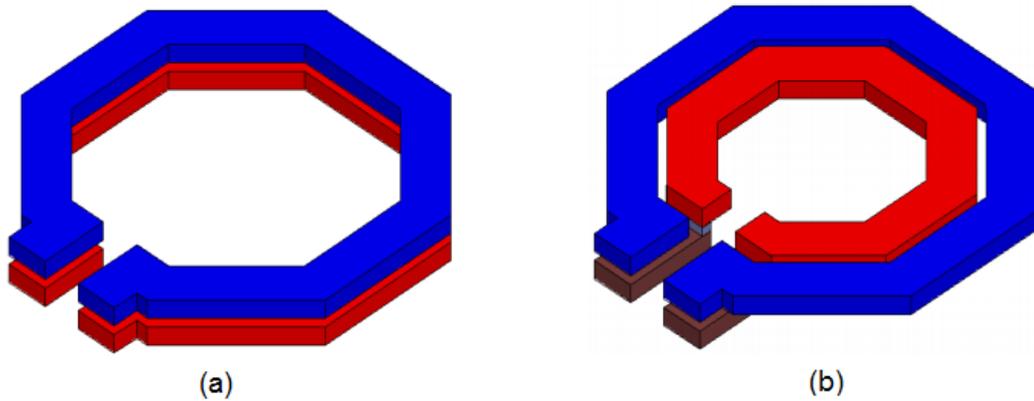
Além da área e fator de qualidade, outra métrica importante para caracterização dos transformadores integrados é a mínima perda de inserção (ILm). O ILm é dependente do fator de qualidade e de acoplamento magnético, quando estes são maximizados aquele será minimizado.

Esta métrica corresponde a atenuação que o transformador introduz no circuito quando as duas portas da entrada estão conectadas uma impedância do seu complexo conjugado, sendo uma impedância que satisfaça um casamento perfeito. Deseja-se obter o menor valor possível de ILm nos transformadores, para não comprometer o desempenho do combinador de potência.

No projeto de transformadores integrados são várias as características diferentes que podem ser atribuídas a com relação a topologia dos indutores. Além das características já citadas, outras igualmente importantes são a respeito da topologia das bobinas (SILVA, R., 2017). É necessária uma pesquisa sobre essas topologias, pois a sua escolha impacta em muitos parâmetros considerados vitais, no desempenho de um transformador.

Com relação ao tipo de acoplamento magnético entre os enrolamentos primário e secundário, há possibilidade de ser vertical ou horizontal. Na FIGURA 4 (a), tem-se o acoplamento vertical entre as bobinas, necessariamente os metais devem ser de camadas de metais diferentes. As vantagens dessa configuração são com relação ao melhor acoplamento magnético entre as bobinas e uma redução de área ocupada (LEITE, B., 2011). Outra topologia de projeto de transformadores está representada na FIGURA 4 (b), com acoplamento magnético lateral. Essa topologia permite que as duas bobinas sejam confeccionadas com a mesma camada de metal. Antagônico a topologia com acoplamento vertical, esta possui menor acoplamento magnético entre suas bobinas. Para essa topologia, tendo a possibilidade de desenhar as bobinas com o mesmo nível de metal, uma das vantagens é o idêntico acoplamento parasita referenciado para o substrato. Essa característica é vantajosa para aplicações em que a simetria com relação aos parasitas é indispensável.

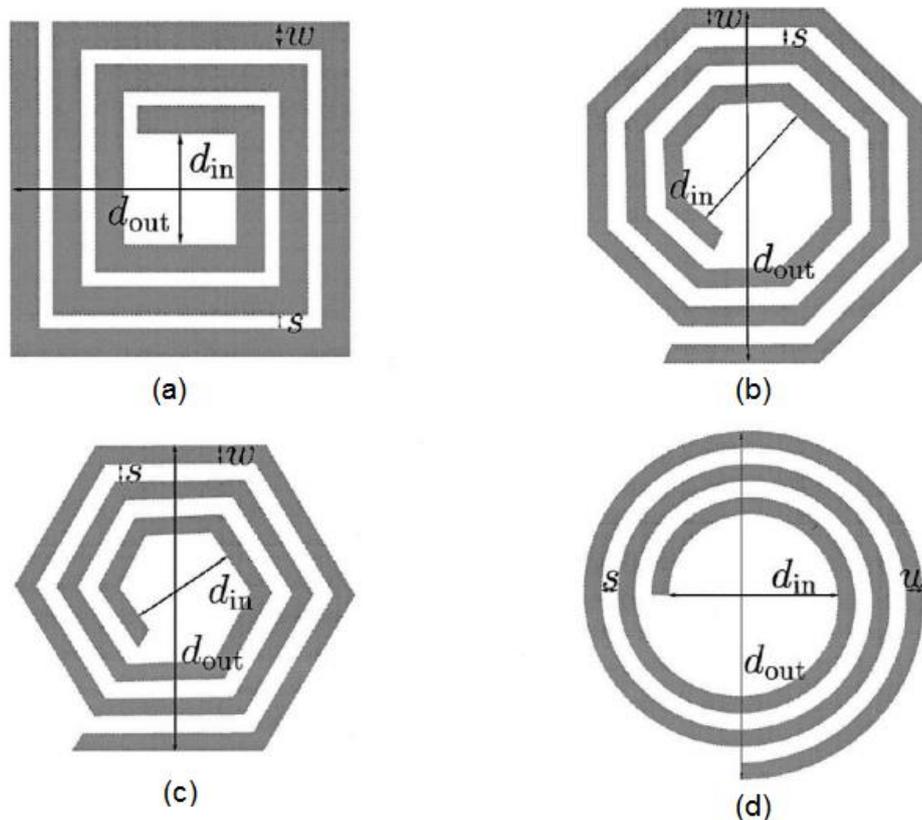
FIGURA 4 - TIPOS DE ACOPLAMENTO MAGNÉTICO



FONTE: LEITE (2011).

Depois da escolha da topologia mais relevante, outra importante escolha a ser realizada, se refere ao formato do enrolamento. Os formatos mais recorrentes de enrolamento são quadrado, octogonal, hexagonal e circular. Esses quatro tipos de enrolamento estão representados na FIGURA 5. O enrolamento circular fornece valores máximos de indutância e fator de qualidade, pois apresenta um maior perímetro para o mesmo raio (SILVA, R., 2017). Porém, devido a tecnologia de fabricação, não é possível o projeto com bobina circular, restrito ao ângulo da trilha (SILVA, R., 2017). Transformadores com formato quadrangular tendem a possuir maior valor de indutância e com o formato octogonal é possível obter melhor fator de qualidade. O modelo octogonal por possuir alto fator Q (LEITE, B., 2011), implica que ele possui menor resistência e capacitâncias parasitas em comparação com seu valor de indutância, acarretando em uma menor perda de inserção. O modelo hexagonal tem um formato que contribui para minimizar o acoplamento entre bobinas adjacentes (LIU, G., 2008). Porém, esse modelo possui um fator de qualidade degradado, decorrente dos ângulos de 120° .

FIGURA 5 - TIPOS DE ENROLAMENTO :
 (a) QUADRADO (b) OCTOGONAL (c) HEXAGONAL (d) CIRCULAR



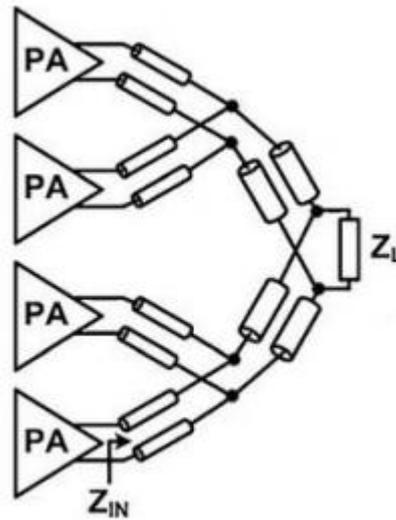
FONTE: MOHAN (1999).

2.2 COMBINADORES DE POTÊNCIA

O levantamento bibliográfico a respeito dos combinadores é a etapa mais importante da revisão da literatura, com o intuito de fornecer os conhecimentos básicos com relação ao projeto de um combinador de potência, foco deste trabalho.

A técnica de combinação de potência é utilizada para poder associar PAs em com o propósito de fornecer maior potência para o circuito. O aumento de potência no transmissor, representa um substancial aumento na capacidade da rede (CHOWDHURY, D., 2009), permitindo grande tráfego de comunicação entre os usuários. Para realizar a soma das potências, há a possibilidade de realizá-la com uma configuração em série ou em paralelo (ZHAO, D., 2015). Na FIGURA 6 consta um exemplo da combinação de potência com a conexão em paralelo dos transformadores integrados. Nesta configuração, ocorre a soma das correntes de todos os PAs, assim a impedância de entrada do combinador é incrementada conforme o aumento de elementos associados.

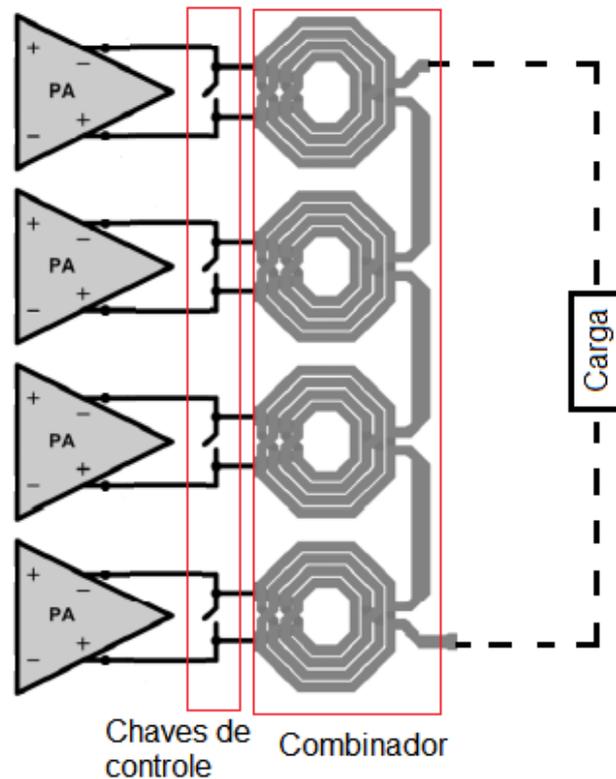
FIGURA 6 - COMBINAÇÃO DE POTÊNCIA COM COMBINADORES EM PARALELO



FONTE: ZHAO (2015).

Outra maneira possível de realizar a soma das potências é associando os combinadores em série. Este modo de combinação está exemplificado na FIGURA 7, o qual apresenta a vantagem de que a impedância de entrada do combinador se mantém a mesma, independente da quantidade de elementos associados. Assim, essa configuração possui capacidade para fornecer uma potência de saída maior, que na conexão em paralelo (ZHAO, D., 2015). Nota-se que no exemplo da FIGURA 7, as bobinas secundárias dos transformadores estão associadas em série, e no primário encontram-se os PAs em paralelo com um dispositivo de controle destes. Com esta chave de controle dos PAs, é possível desativar alguns sem prejuízo aos demais, conforme a demanda de potência.

FIGURA 7 - COMBINADORES COM ASSOCIAÇÃO EM SÉRIE

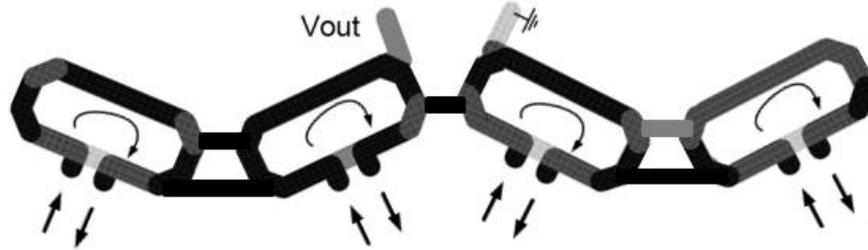


FONTE: ADAPTADO DE PYE (2011).

Em ambas configurações a combinação dos PAs sempre será em paralelo, pois caso necessite desabilitar algum amplificador, conforme a demanda de potência, o circuito combinador tem seu funcionamento inalterado.

Este trabalho tem como objetivo o projeto de uma combinação de potência de 4 PAs, com uma configuração semelhante a proposta da FIGURA 7. A única diferença será na associação dos transformadores, inserindo um ângulo de rotação para cada transformador adjacente. Essa técnica rotacional pode ser observada na FIGURA 8, que tem como objetivo minimizar o efeito do acoplamento magnético negativo, devido a proximidade das bobinas adjacentes. Dessa maneira as correntes dos enrolamentos adjacentes não terão orientação paralela, diminuindo este efeito indesejado.

FIGURA 8 - COMBINADOR DE POTENCIA COM TOPOLOGIA OCTOGONAL COM ROTAÇÃO



FONTE: ADAPTADO DE LIU (2008).

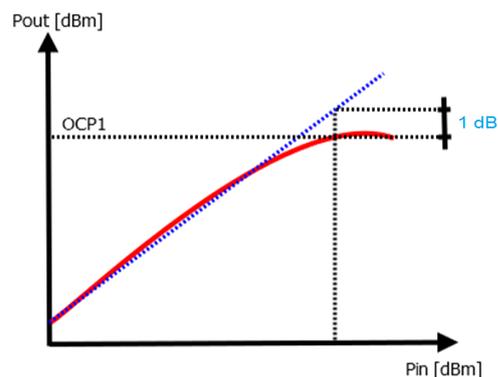
2.3 MÉTRICAS DOS PAs

No projeto de um amplificador de potência são necessários avaliação de alguns parâmetros, entre os principais estão o ponto de compressão em 1dB (OCP_{1dB}), e a eficiência (PAE).

2.3.1 Ponto de compressão de 1dB

Uma das métricas mais importante para caracterização de um PA, é o OCP_{1dB} , representando o comportamento não linear do amplificador. Para uma análise de “pequenos sinais”, uma excitação na entrada do PA gera uma potência de saída proporcional a entrada, característica linear do amplificador. Esse comportamento pode ser observado graficamente na FIGURA 9. O modo linear do PA acaba quando a curva de amplificação do PA (em vermelho) se distancia da reta linear (em azul).

FIGURA 9 - PONTO DE COMPRESSÃO DE 1 dB



FONTE: O autor (2017)

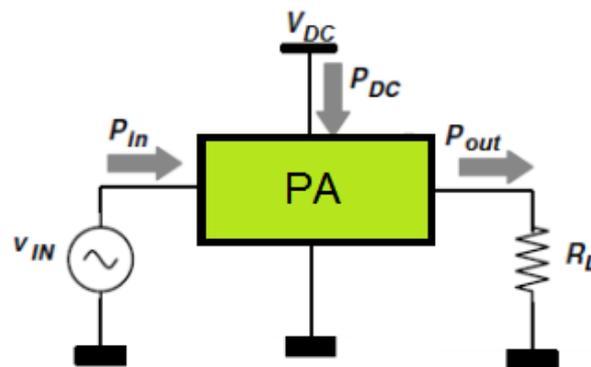
O OCP_{1dB} recebe numericamente um valor de potência de saída do amplificador, no qual ela se desviou 1 dB do comportamento linear.

2.3.2 Eficiência

A eficiência de potência adicionada (PAE) é uma métrica de rendimento do PA. Normalmente a máxima eficiência ocorre quando é inserida na entrada uma potência que gera a máxima potência de saída. Na FIGURA 10, estão ilustradas as potências que contribuem para a eficiência. Para a eficiência do PA, os parâmetros que influenciam são: potência de entrada (P_{in}), potência de saída (P_{out}) e potência fornecida pela fonte de alimentação (P_{DC}). A PAE pode ser calculada com a seguinte fórmula:

$$PAE = \frac{(P_{out} - P_{in})}{P_{DC}} \quad (7).$$

FIGURA 10 - POTÊNCIAS DO PA



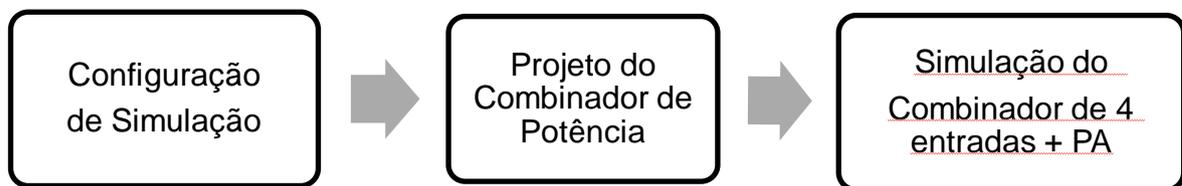
FONTE: O autor (2017)

Os circuitos do transmissor, especialmente o PA, são projetados para que seu funcionamento seja o mais eficiente quando a potência transmitida é máxima.

3 METODOLOGIA

Nesta seção será detalhado o caminho percorrido para o desenvolvimento do projeto do combinador de potência. Conforme ilustrado na FIGURA 11, a metodologia adotada possui três etapas principais. Na parte inicial foi realizada uma configuração de simulação, com o objetivo de validar um combinador de 2 entradas, projetado anteriormente pelo trabalho de DENG(2017). Na etapa seguinte, será abordada as técnicas utilizadas para a concepção dos transformadores. Na terceira etapa, foi acrescentado na célula de simulação o combinador projetado para associar 4 PAs.

FIGURA 11 – ETAPAS DA METODOLOGIA DO TRABALHO



FONTE: O autor (2017)

3.1 SIMULAÇÃO ELETROMAGNÉTICA

Com os resultados desta simulação é possível avaliar o transformador e posteriormente o combinador. Foram realizadas simulações eletromagnéticas com o método de elementos finitos (FEM) com o programa computacional ADS. O programa extrai os parâmetros de impedância dos elementos simulados, e a partir destes é possível obter os parâmetros necessários para avaliação do transformador e do combinador, como por exemplo, IL_m , Q e L .

Foi usado um arquivo de descrição dos níveis de metais e dielétricos da tecnologia CMOS 130 nm da GLOBALFOUNDRIES. Selecionou-se uma simulação com variação adaptativa de frequência, e como critério de convergência, foi definido um valor de erro inferior a 0,01 sobre a matriz de parâmetros de espalhamento (parâmetros S).

Com auxílio do ADS para realizar uma simulação eletromagnética no leiaute do combinador ou transformador, é possível a extração dos parâmetros S em um arquivo com a extensão “.SNP”, em que N corresponde à quantidade de portas de entrada e saída. No Virtuoso é possível criar um componente e anexar o arquivo

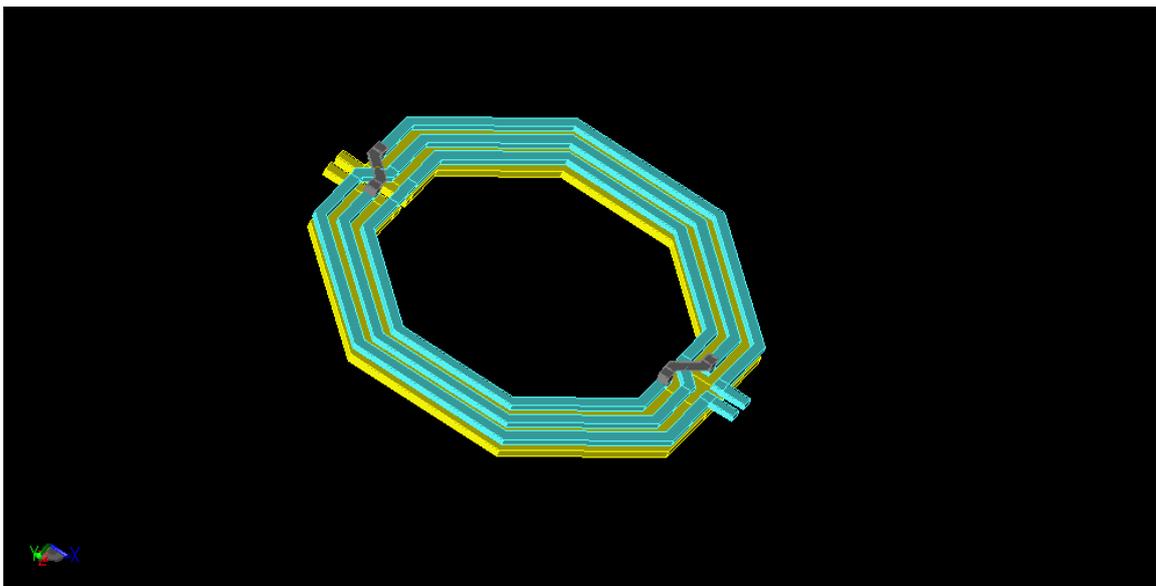
extraído com os parâmetros S, assim será possível investigar o comportamento do combinador associado com a rede de casamento de impedância e os PAs.

3.2 ESTUDO DO TRANSFORMADOR

Para obtenção de uma configuração de simulação de um combinador, faz-se necessário o estudo do transformador, célula básica do combinador. Baseou-se no trabalho de DENG(2017), no qual foram testados e simulados alguns transformadores variando o diâmetro das bobinas, trilha dos indutores, número de voltas e tipos de acoplamento.

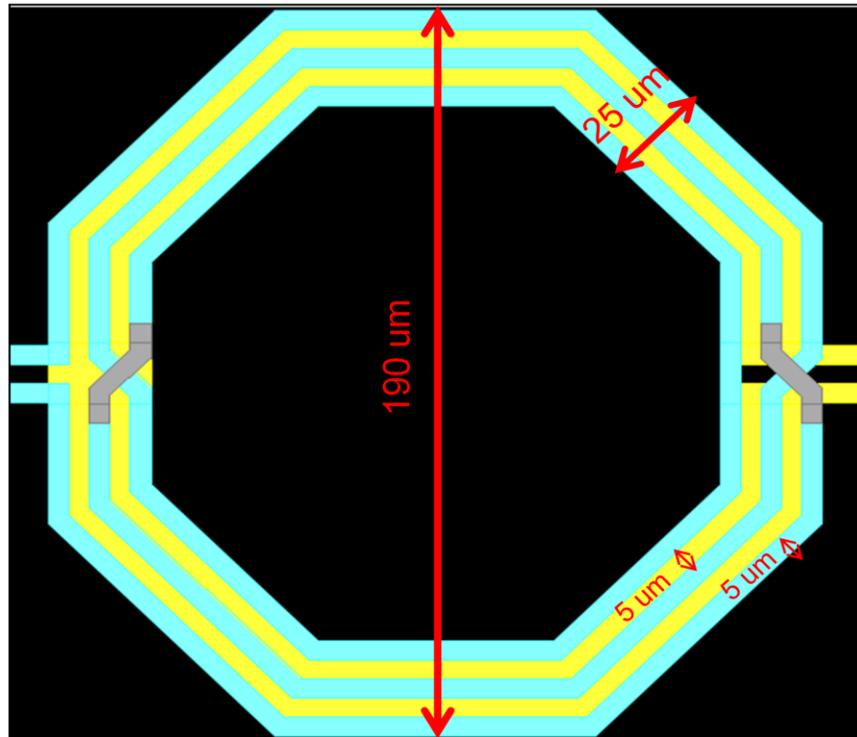
O transformador com melhor desempenho foi para um diâmetro externo (D) de 190 μm , com uma bobina no enrolamento primário e três no secundário. A bobina do primário foi utilizada o nível de metal mais alto da tecnologia, MA, e uma largura de trilhas (W) de 25 μm . Para as três bobinas do secundário foi utilizado o segundo metal mais alto, E1, com uma largura de 5 μm e um espaçamento entre voltas de igual valor. Este transformador está representado em 3D na FIGURA 12, com acoplamento magnético vertical.

FIGURA 12 - TRANSFORMADOR ESCOLHIDO PARA CONSTITUIR O COMBINADOR



FONTE: DENG (2017)

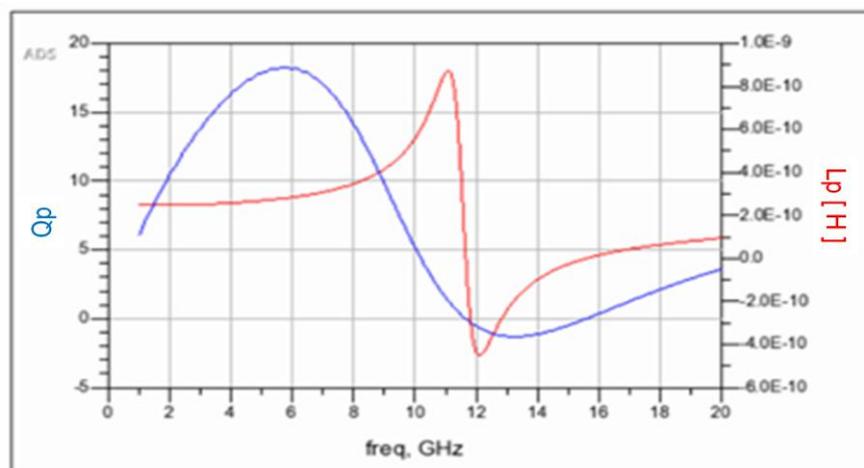
FIGURA 13 - DIMENSÕES FÍSICAS DO TRANSFORMADOR



FONTE: DENG (2017)

Para uma frequência de operação em 2,4 GHz, a bobina primária apresentou uma indutância primária de 0,25 η H e um fator de qualidade de aproximadamente 12. Estes valores, bem como a frequência de ressonância de aproximadamente 12 GHz, podem ser observados no GRÁFICO 1.

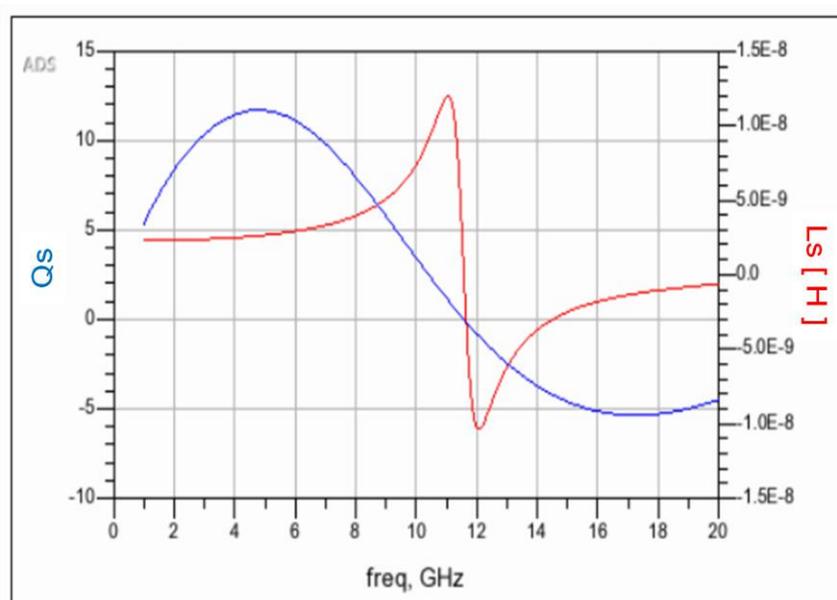
GRÁFICO 1 - FATOR DE QUALIDADE E INDUTÂNCIA DO ENROLAMENTO PRIMÁRIO



FONTE: O autor (2017)

Para este mesmo transformador a frequência ressonante foi idêntica para o enrolamento secundário, a indutância foi de 2,4 nH com um Q_{sec} de 9,3. A indutância secundária foi substancialmente maior devido ao comprimento elétrico da bobina ser maior, porém o fator Q_{prim} foi mais elevado, pois a trilha da bobina foi mais larga, contribuindo com menos resistência. Os valores de Q_{sec} e L_{sec} para bobina secundária estão ilustrados no GRÁFICO 2.

GRÁFICO 2 - FATOR DE QUALIDADE E INDUTÂNCIA DO ENROLAMENTO SECUNDÁRIO

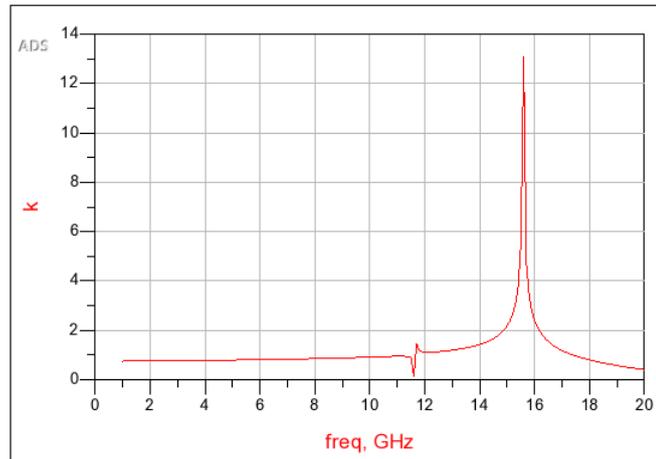


FONTE: O autor (2017)

Este transformador, com acoplamento magnético vertical, possui valor de 0,75 para frequências até 12 GHz, este comportamento pode ser observado no GRÁFICO 3.

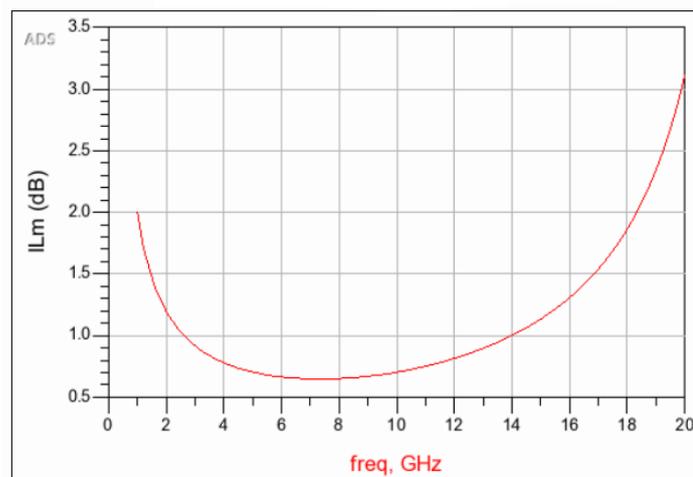
A escolha desta configuração de transformador se deve, entre todos os modelos simulados, a este que apresentou menor valor de perda de inserção. Entre os transformadores estudados, este obteve melhor valor de IL_m , em consequência de altos valores de Q_{prim} , Q_{sec} e k . Para a frequência de operação de 2,4 GHz este apresentou um IL_m de 1,06 dB, e seu menor valor foi de 0,7 dB para uma frequência de 8 GHz. No GRÁFICO 4 está o comportamento desta métrica em função da frequência.

GRÁFICO 3 - ACOPLAMENTO MAGNÉTICO



FONTE: O autor (2017)

GRÁFICO 4 - MÍNIMA PERDA DE INSERÇÃO DO TRANSFORMADOR
UTILIZADO NO COMBINADOR



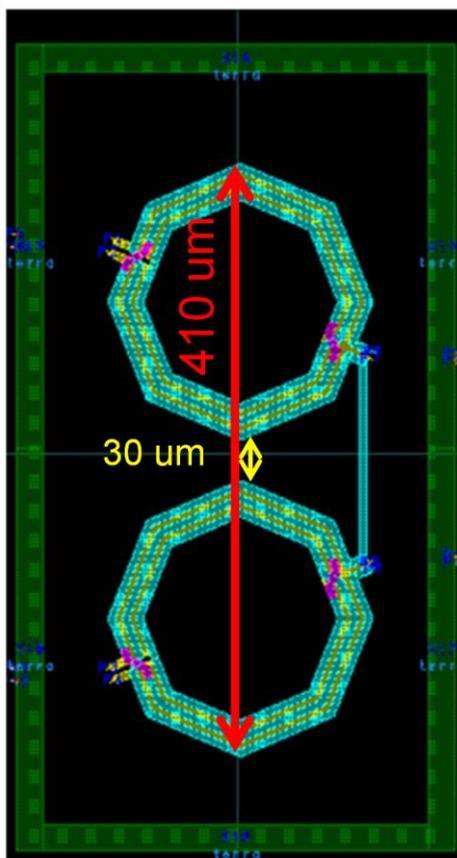
FONTE: O autor (2017)

3.3 COMBINADOR DE POTÊNCIA DE 2 ENTRADAS

Este combinador de duas entradas foi projetado por DENG (2017). Para constituição do combinador foi utilizado o transformador detalhado na seção anterior. A associação de dois transformadores corresponde ao combinador que está ilustrado na FIGURA 14. Pode-se observar que foram utilizadas duas técnicas com o objetivo de diminuir o acoplamento entre enrolamentos adjacente. A primeira foi o afastamento entre as bobinas de $30\ \mu\text{m}$. Além de aumentar a área de silício, esta técnica não foi suficiente para minimizar o acoplamento adjacente. Foi necessário o artifício de rotacionar as bobinas, e o melhor ângulo foi de $22,5^\circ$, de modo que a

corrente que flui em cada enrolamento não permaneça em paralelo em relação a corrente adjacente. Este combinador obteve um valor de IL_m de 1,06 dB, idêntico ao valor desta métrica para apenas um transformador.

FIGURA 14 - COMBINADOR DE 2 ENTRADAS

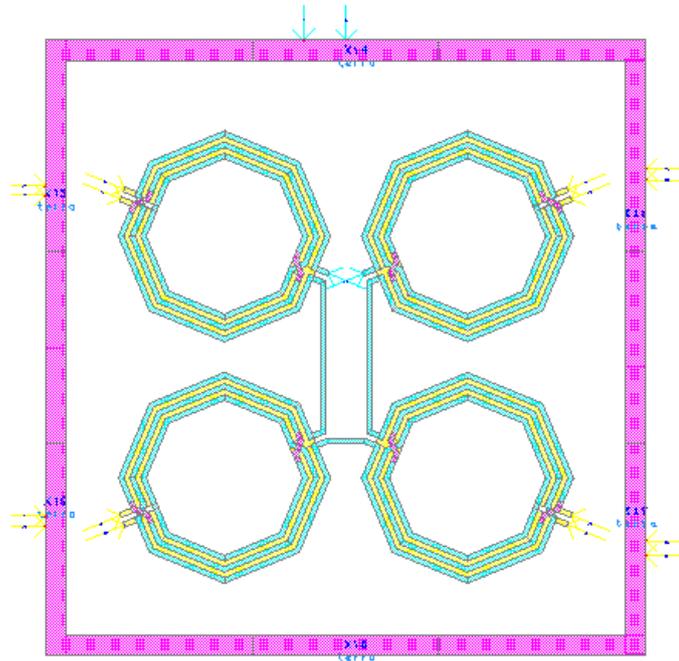


FONTE: DENG (2017)

3.4 COMBINADOR DE POTÊNCIA DE 4 ENTRADAS

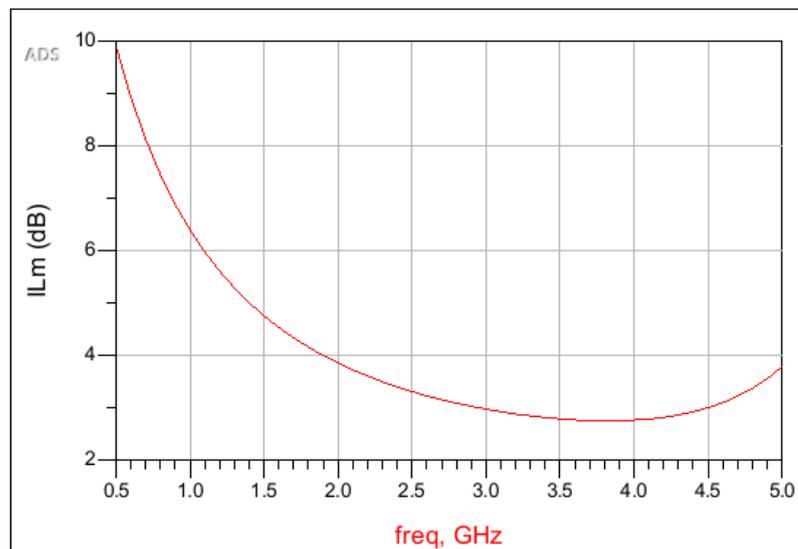
A partir do transformador com a menor perda de inserção foi confeccionado um combinador de potência de quatro entradas. O primeiro protótipo foi simulado a partir de quatro transformadores dispostos de um formato quadrangular, conforme a FIGURA 15. Foi mantida a distância de 30 μm entre as bobinas adjacentes e um ângulo de rotação de 22,5°. Na primeira seleção de um combinador, a métrica de avaliação é o IL_m , que para este caso foi de 3,8 dB, tornando-o inviável. Este parâmetro, representado no GRÁFICO 5, não apresentando um valor próximo de 2 dB (valor máximo desejado), para qualquer frequência de 0 até 20 GHz.

FIGURA 15 - COMBINADOR DE 4 ENTRADAS COM LEIAUTE QUADRANGULAR



FONTE: O autor (2017)

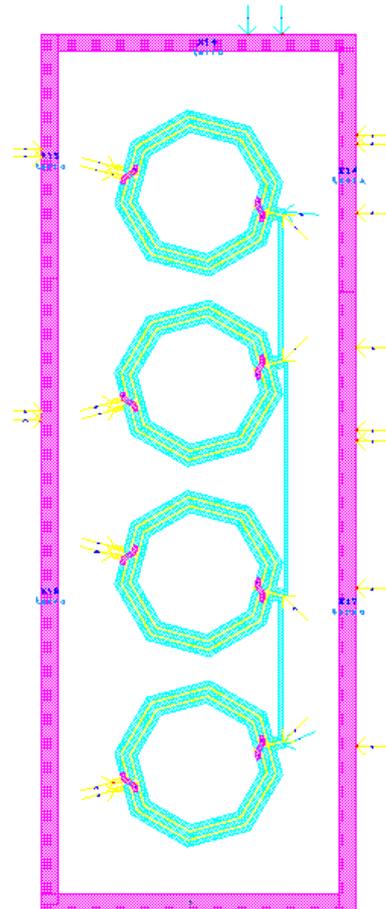
GRÁFICO 5 - ILm PARA COMBINADOR NO FORMATO DE UMA MATRIZ 2X2



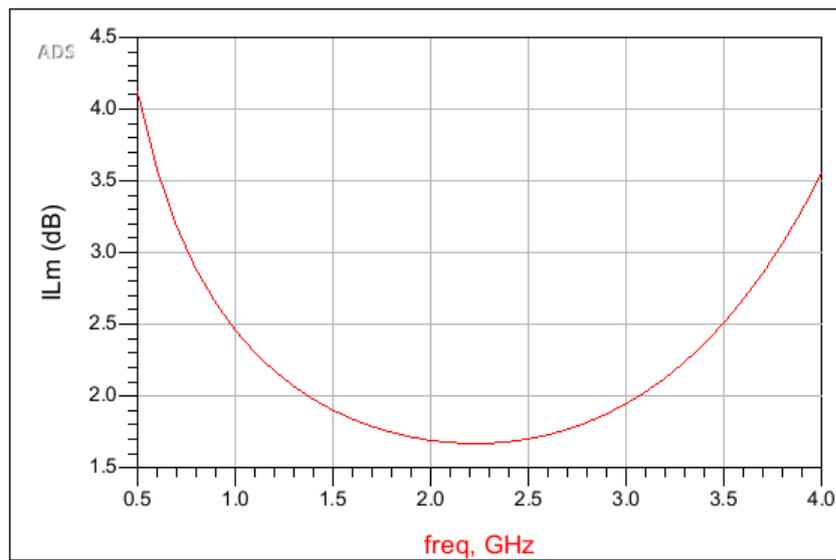
FONTE: O autor (2017)

Com o objetivo de diminuir o ILm, foi simulado um combinador com os mesmos transformadores, com a diferença de organizá-los em uma única fileira. Esta topologia está representada na FIGURA 16. Foi avaliado o melhor ângulo de rotação entre transformadores adjacentes, e para este modelo de combinador, com o ângulo de 30° foi obtido o melhor desempenho, com uma ILm de 1,78 dB, plotado no GRÁFICO 6.

FIGURA 16 – 4 COMBINADOR EM FILEIRA



FONTE: O autor (2017)

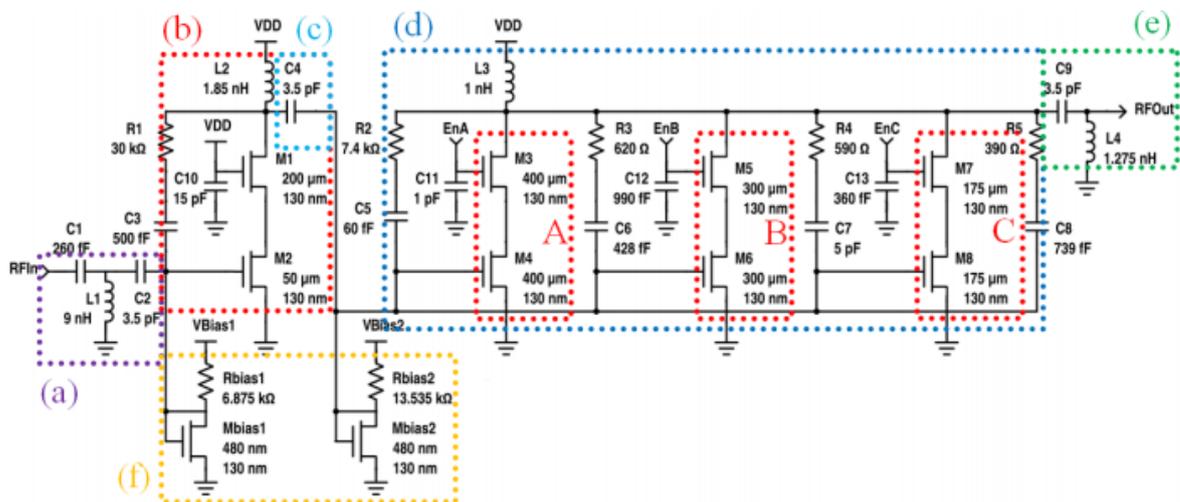
GRÁFICO 6 - IL_m PARA COMBINADOR NO FORMATO DE UMA MATRIZ 4X1

FONTE: O autor (2017)

3.5 PA PRÉ-PROJETADO

Para poder avaliar e validar o combinador de quatro entradas, é importante a simulação deste com um PA. Foi utilizado um amplificador projetado para a mesma frequência de operação do combinador, 2,4 GHz, em tecnologia CMOS 130 nm. O circuito esquemático deste PA está representado na FIGURA 17, no qual os circuitos (a), (c) e (e) representam casamento de impedâncias. O bloco (b) é o estágio de ganho do amplificador, tendo o bloco (d) responsável pela potência do dispositivo e o circuito (f) é a referência de tensão. Para este trabalho, o PA é ajustado de modo a fornecer o maior ganho possível, pois a avaliação será da combinação de 4 PAs.

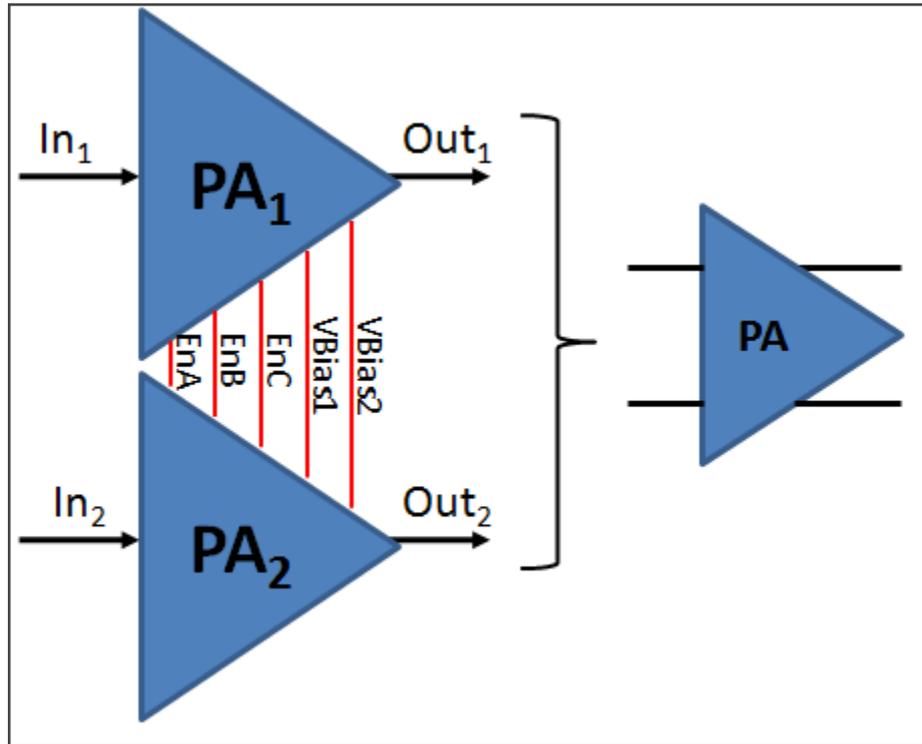
FIGURA 17 - PA PRÉ - PROJETADO



FONTE: SANTOS (2016)

A partir de duas desta célula de amplificação representada na FIGURA 17, foi possível criar um PA diferencial, que está representado na FIGURA 18. Os dois PAs são interligados em paralelo, ou seja, tanto as tensões de referência como as tensões de controle de ganho são compartilhadas para os dois dispositivos.

FIGURA 18 - PA DIFERENCIAL



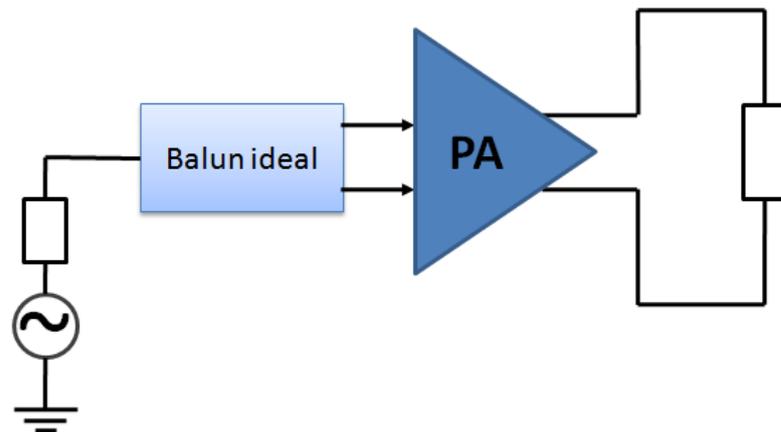
FONTE: O autor (2017)

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 CONFIGURAÇÃO DE SIMULAÇÃO

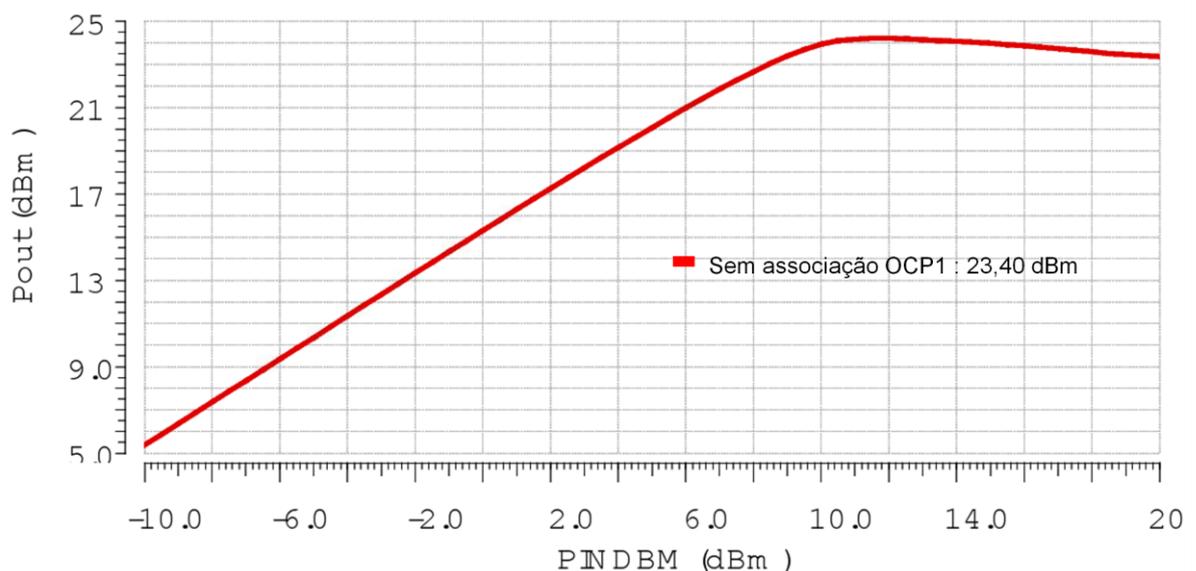
Um dos objetivos deste trabalho foi arquitetar uma configuração de simulação de um PA diferencial com um combinador, ambos pré-projetados. Para isso, foi utilizado o combinador de 2 entradas de DENG(2016) e o PA de SANTOS(2016). A primeira simulação consiste em obter o valor de OCP_{1dB} do PA sem associação de potência. A configuração de simulação está representada na Figura 19, na qual foi necessária a utilização de um divisor de potência ideal na entrada do PA. Como resultado, obteve-se a curva de amplificação plotada no GRÁFICO 7, com um OCP_{1dB} de 23,4 dBm.

Figura 19 - CONFIGURAÇÃO DE SIMULAÇÃO INICIAL



FONTE: O autor (2017)

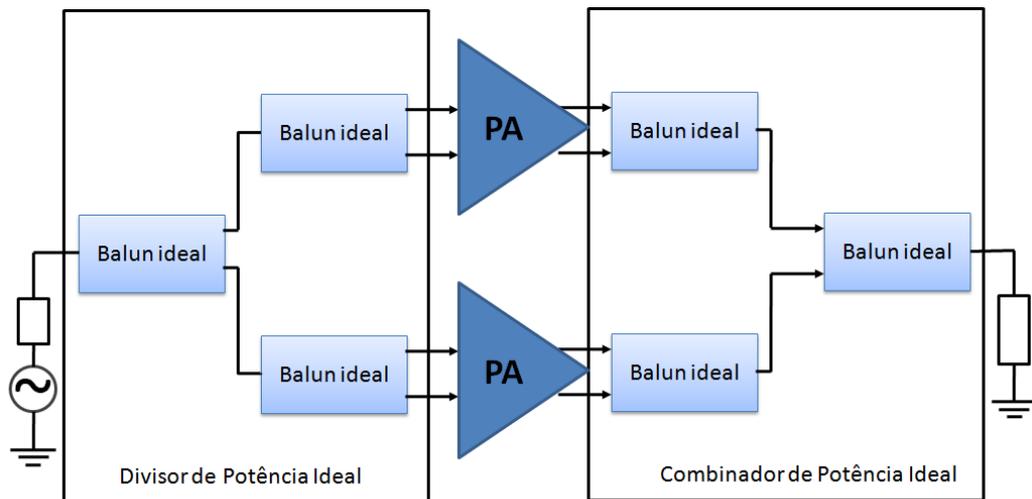
GRÁFICO 7 - CURVA DE AMPLIFICAÇÃO DE UM PA SEM ASSOCIAÇÃO



FONTE: O autor (2017)

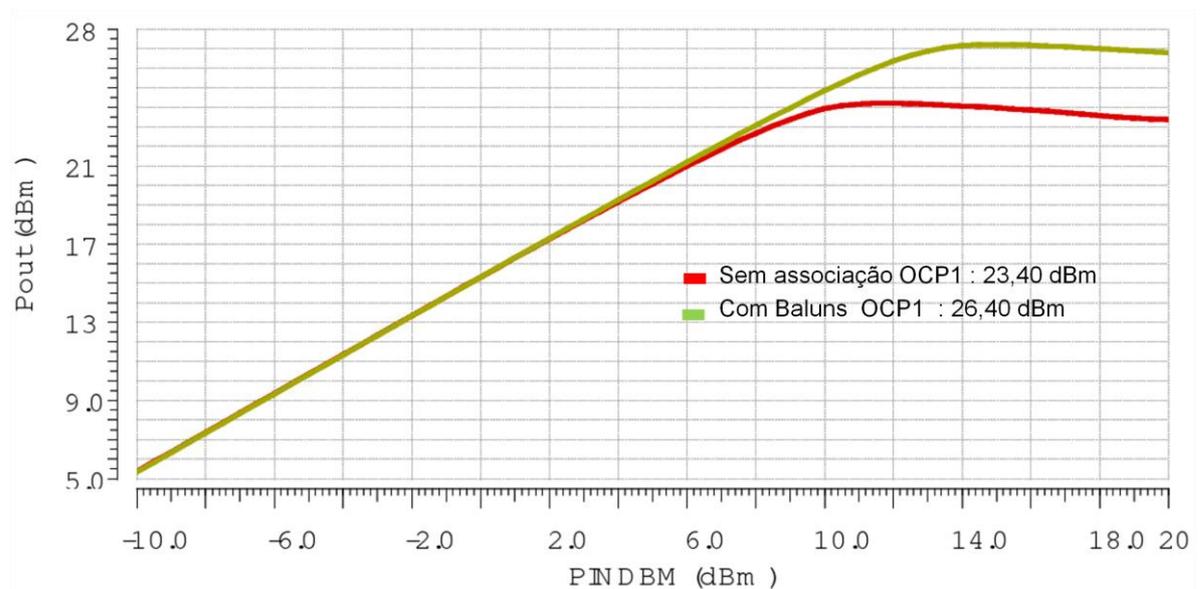
Este valor deve ser aumentado em 3 dB, no caso de uma combinação ideal, ou seja, dobrando a sua potência, quando associado com um outro PA idêntico. Na FIGURA 20 está a configuração utilizada para poder fazer a associação de 2 PAs. Como foram utilizados combinadores ideais, não ocorre a atenuação da potência de saída devido a perda de inserção do combinador. Pode-se observar no GRÁFICO 8, que com a combinação ideal de potência, na potência de saída foram adicionados 3 dB em relação ao OCP_{1dB} sem associação.

FIGURA 20 - ASSOCIAÇÃO DE 2 PAs COM COMBINADORES IDEAIS



FONTE: O autor (2017)

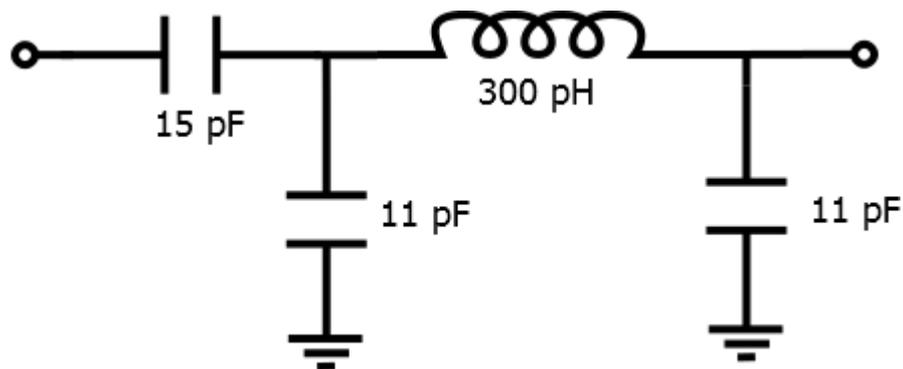
GRÁFICO 8 - COMBINAÇÃO IDEAL DE 2 AMPLIFICADORES



FONTE: O autor (2017)

Para circuitos reais será necessário inserir um casamento de impedâncias entre o PA e o combinador, que minimize a perda de inserção e assim entregue na saída uma potência máxima. Na FIGURA 21 podem-se observar os valores dos componentes deste circuito de casamento de impedância.

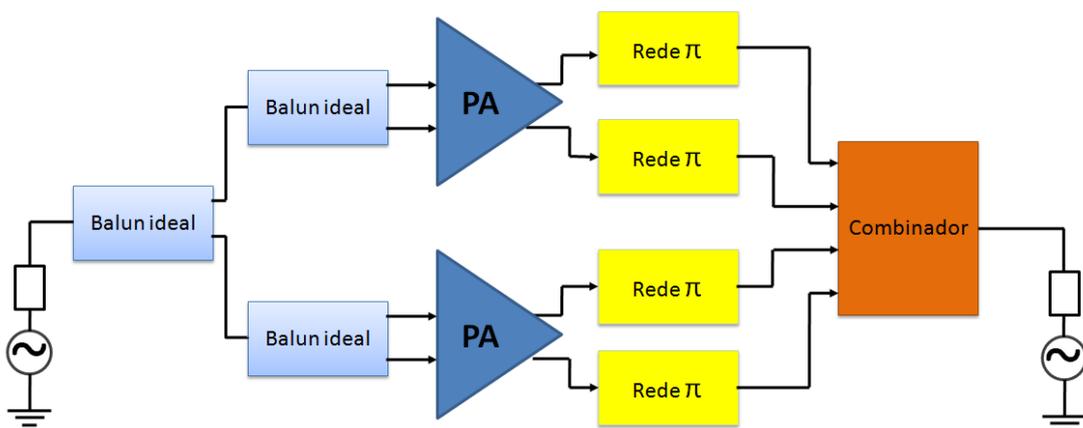
FIGURA 21 - CIRCUITO DE CASAMENTO DE IMPEDÂNCIAS



FONTE: O autor (2017)

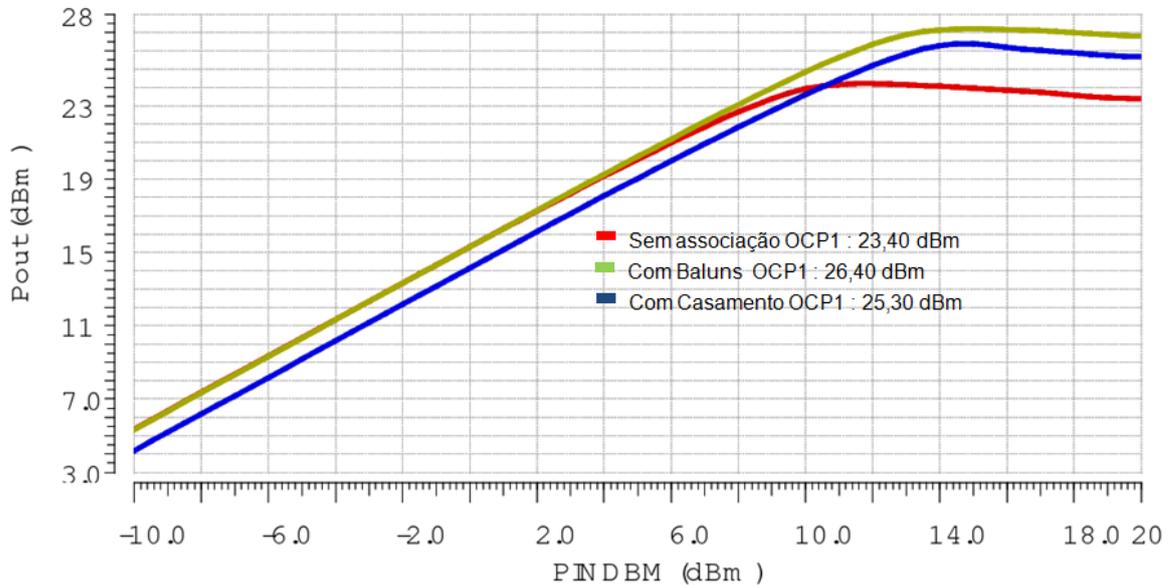
A configuração desta etapa está na FIGURA 22, em que para este caso o melhor casamento foi para um modelo π . Como a IL_m foi de aproximadamente 1 dB, a saída deve ser próxima de 25,4 dBm, conforme o esperado, o OCP_{1dB} foi de 25,3 dBm e está representado no GRÁFICO 9.

FIGURA 22 - COMBINAÇÃO DE POTÊNCIA COM CASAMENTO DE IMPEDÂNCIAS



FONTE: O autor (2017)

GRÁFICO 9 - CURVA DE AMPLIFICAÇÃO PARA COMBINAÇÃO DE POTÊNCIA COM COMBINADOR NÃO IDEAL

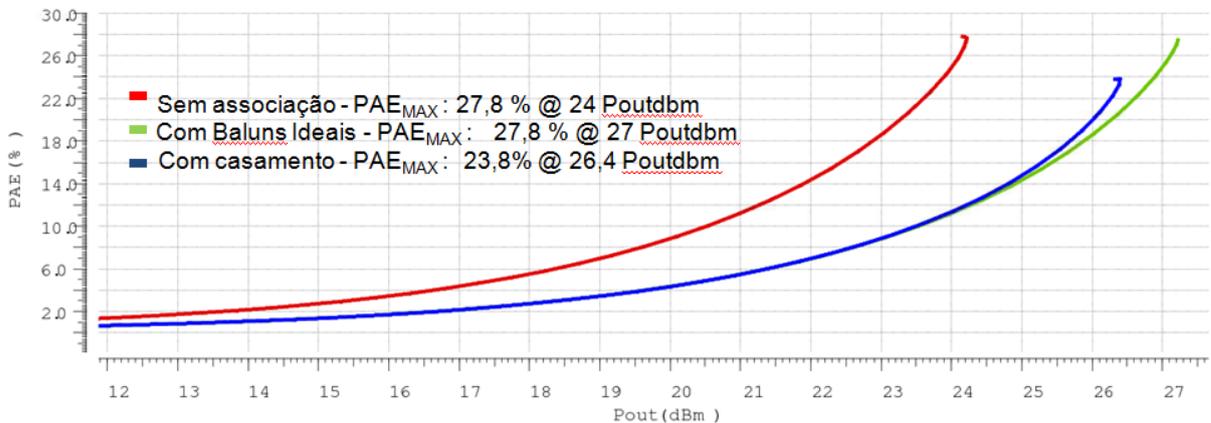


FONTE: O autor (2017)

Pode-se observar na curva de amplificação, com os combinadores reais, que a perda de inserção foi de 1,10 dB. Com a simulação eletromagnética a perda de inserção mínima foi de 1,06 dB. Graficamente é possível observar o efeito que a métrica ILM impõe no circuito, se não tivesse essa perda, a curva vermelha iria se sobrepor a curva de associação ideal.

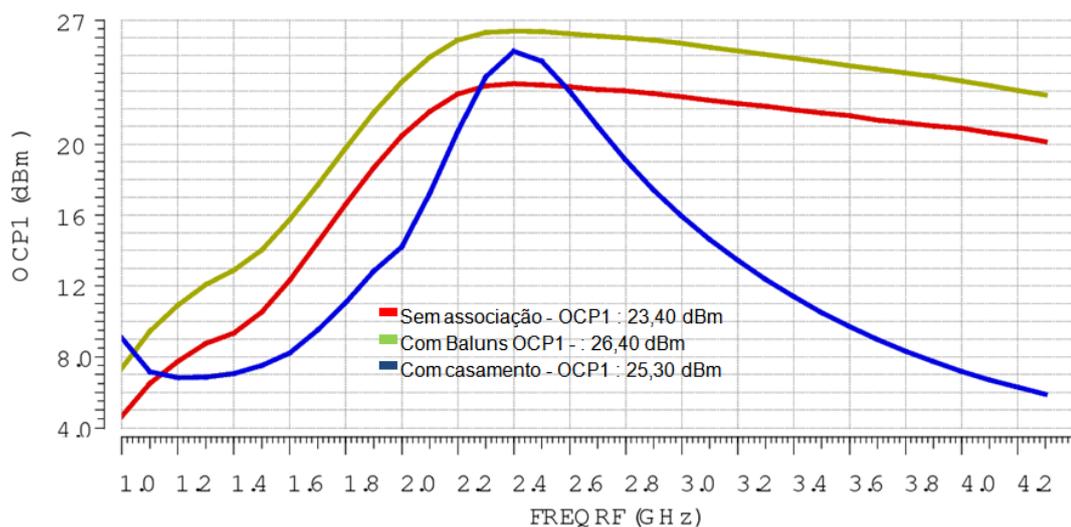
Para as três configurações acima foram realizadas simulações para avaliar a eficiência em função da potência de saída. Esta característica está representada no GRÁFICO 10. A eficiência tanto para o PA sem associação como para o combinador ideal foi de 27,8 %. Esta eficiência é alcançada no combinador ideal para um potência de saída de 27 dBm, e para um único PA em 24 dBm. Estes valores estão coerentes, pois a configuração com os combinadores ideais possuem um consumo maior, porém possui OCP_{1dB} elevado, fazendo que tenha a mesma eficiência de uma configuração que possui menor consumo. A associação de PAs com combinadores reais reduziu a eficiência, para 23,8 %, pois nesse caso há atenuação causada pela perda de inserção que diminui a potência de saída, diferente para o caso de associação com combinadores ideais.

GRÁFICO 10 - PAE X POUT PARA COMBINADOR DE 2 ENTRADAS



FONTE: O autor (2017)

Uma simulação com característica interessante, é avaliar o comportamento da métrica OCP_{1dB} com variação na frequência. Esta característica está representada no GRÁFICO 11, em que o comportamento de um único PA e associação ideal de 2 PAs se assemelham, apenas com uma diferença entre as curvas de 3 dB devido a combinação de potência. Para a combinação real de 2 PAs a característica possui comportamento diferente, tendo um pico de OCP_{1dB} para uma única frequência, 2,4 GHz. Para uma frequência de 0 até 2,4 GHz, as três curvas possuem comportamento crescente. Para frequência superior à de operação, o combinador real possui característica decrescente abrupta, e para os outros dois casos, a curva possui um leve decaimento. Esta seletividade em frequência é devida à resposta do circuito de casamento de impedância acrescentado.

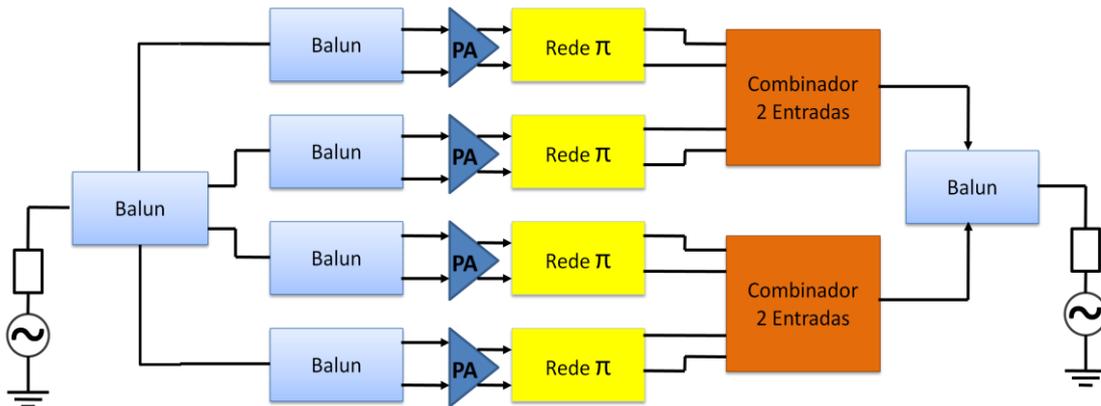
GRÁFICO 11 - VARIAÇÃO DE OCP_{1dB} PARA COMBINADOR DE 2 ENTRADAS

FONTE: O autor (2017)

4.2 SIMULAÇÃO DO COMBINADOR DE 4 ENTRADAS

Como primeiro teste para combinar a potência de 4 PAs, é proposta uma configuração associando 2 combinadores simulado anteriormente. Como resultado, tem-se uma associação formada por 2 combinadores de duas entradas, e sua representação consta na FIGURA 23.

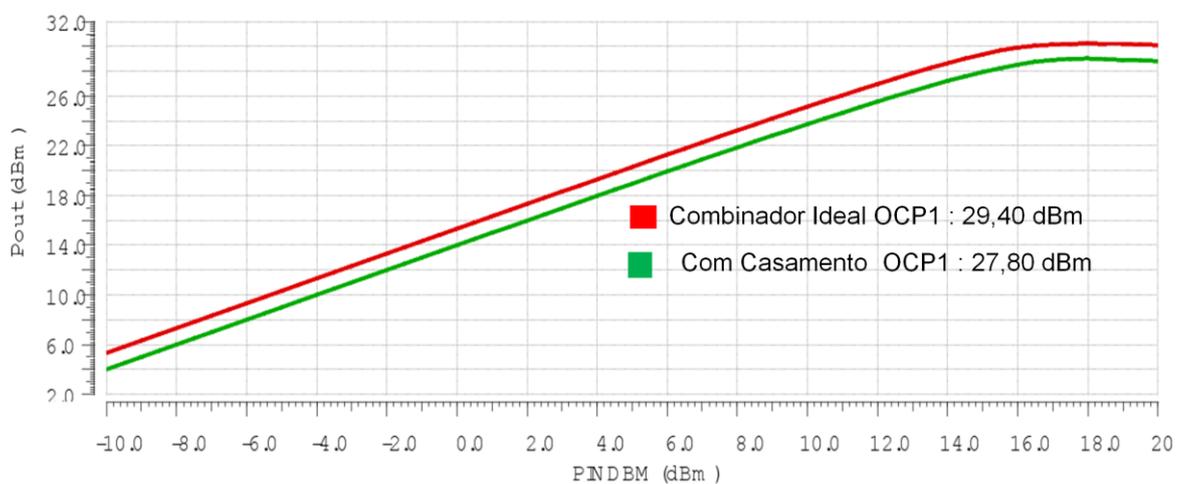
FIGURA 23 - ASSOCIAÇÃO DE 4 PAs COM 2 COMBINADORES



FONTE: O autor (2017)

Utilizando o mesmo casamento de impedância, rede em π , a potência de saída chegou a 27,8 dBm, como está representado no GRÁFICO 12. Nota-se que a diferença entre o sinal com o combinador ideal e o real, se mantém independente da potência injetada na entrada, e essa diferença representa a perda de inserção, com aproximadamente 1,6 dB.

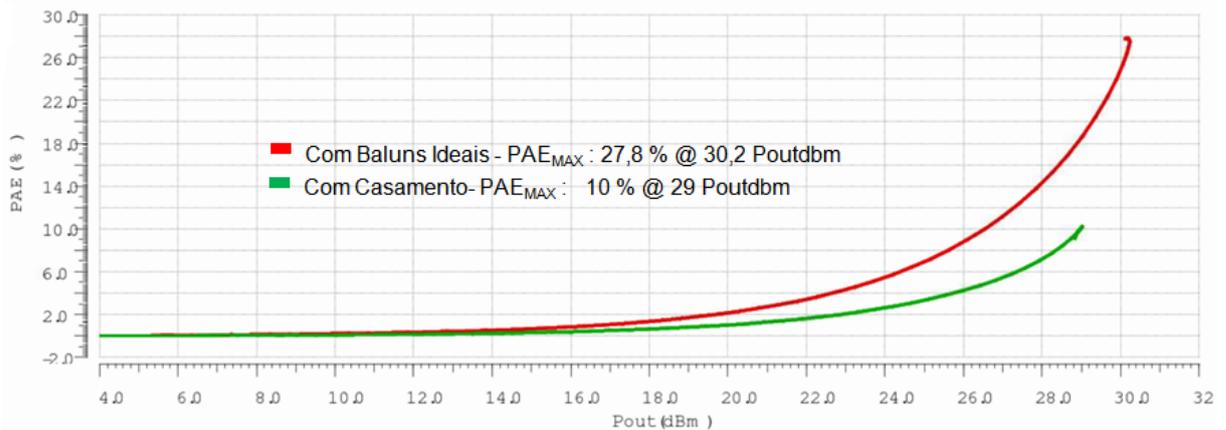
GRÁFICO 12 - CURVA DE AMPLIFICAÇÃO PARA COMBINAÇÃO DE 4 AMPLIFICADORES COM COMBINADOR NÃO IDEAL



FONTE: O autor (2017)

O resultado da avaliação da eficiência em função da potência de saída para esta associação está representado no GRÁFICO 13. A eficiência máxima para o PA com combinador ideal foi de 27,8 %, e para o combinador real ficou em 10 %. Normalmente o aceitável é uma eficiência para o PA de 25 %, necessitando de melhorias neste combinador.

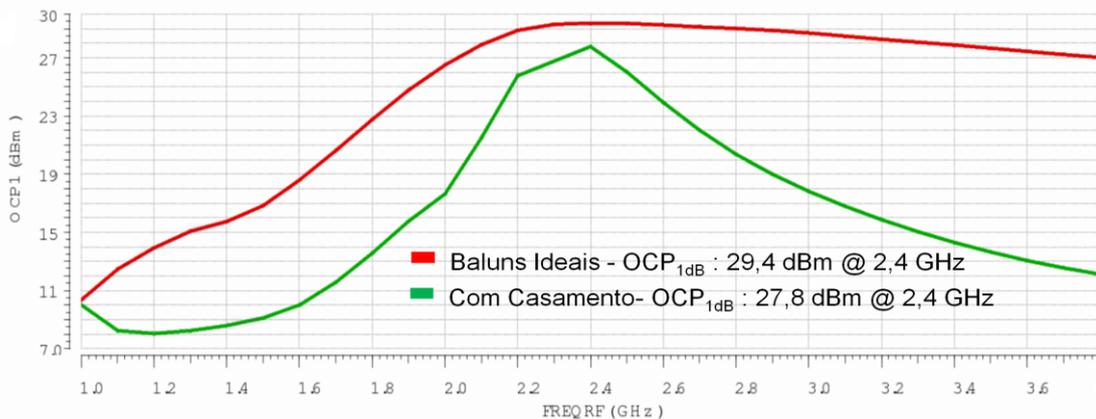
GRÁFICO 13 - PAE X POUT PARA COMBINADOR DE 4 ENTRADAS



FONTE: O autor (2017)

A avaliação do OCP_{1dB} para uma variação na frequência, para este combinador, está representada no GRÁFICO 14. Apresentou comportamento idêntico para a combinação de dois PAs, apresentando valor máximo de OCP_{1dB} , 27,7 dBm, na frequência de operação do combinador.

GRÁFICO 14 - VARIAÇÃO DE OCP_{1dB} PARA COMBINADOR DE 4 ENTRADAS

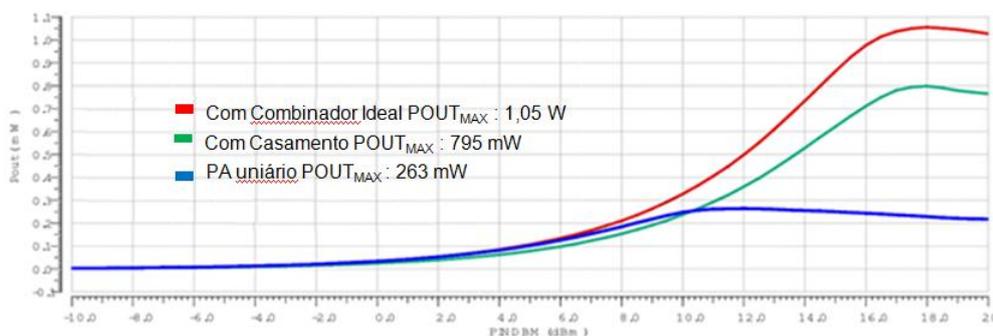


FONTE: O autor (2017)

Fazendo a transformação da potência de saída para watts, tem-se o resultado representado no GRÁFICO 15. Na qual a potência de saída de um único PA é de

aproximadamente 260 mW, e para uma combinação ideal de 4 desses PAs alcançou 1,05 W. Estes valores estão coerentes, pois com a combinação ideal a potência deve quadruplicar a potência de um PA. Com a soma das potências a partir do combinador real, a potência de saída tem máximo de aproximadamente 800 mW. Nota-se que ocorreu uma perda de 200 mW, pois o combinador projetado insere no sistema perdas, representado pelo parâmetro IL_m , e ainda dependente do casamento de impedâncias.

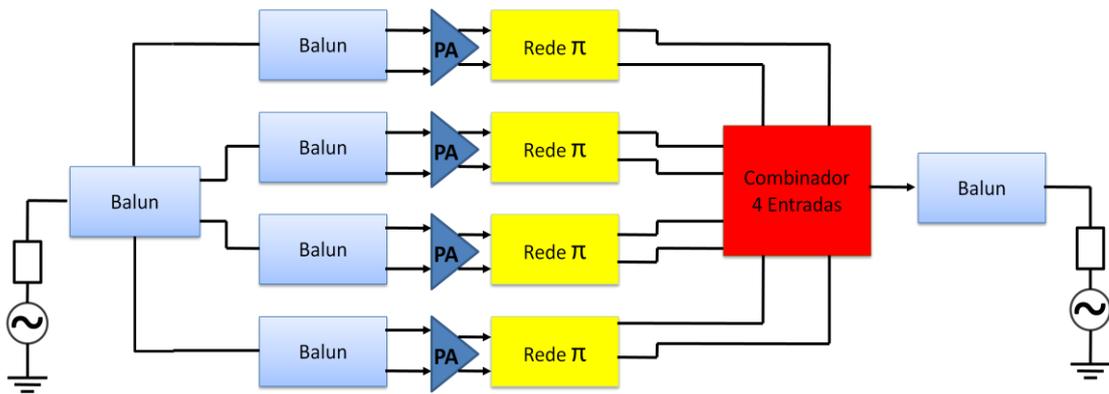
GRÁFICO 15 - POTÊNCIA DE SAÍDA



FONTE: O autor (2017)

Outro combinador de 4 PAs é proposto, utilizando o combinador projetado neste trabalho, representado na FIGURA 16. O esquemático de simulação está ilustrado na FIGURA 24, no qual foi utilizado a mesma rede de casamento de impedâncias para os casos anteriores. Com a simulação deste único combinador, que teve uma IL_m de 1,78 dB, esperava-se um OCP_{1dB} de 27,6 dBm. Mas devido a um casamento ruim, o combinador não somou as potências de saída corretamente, tendo o melhor parâmetro de OCP_{1dB} em 23,4 dBm. É necessário neste caso melhorar o casamento de impedâncias para poder somar as potências dos PAs de maneira correta.

FIGURA 24 - ASSOCIAÇÃO DE 4 PAs COM 1 COMBINADOR

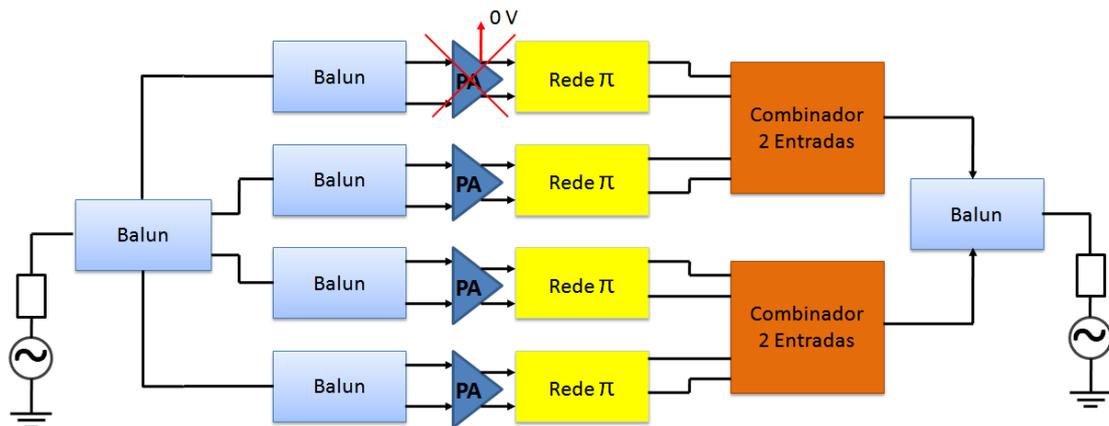


FONTE: O autor (2017)

4.3 PAs RECONFIGURÁVEIS

A partir do combinador e da rede de casamento de impedâncias validados anteriormente, foi realizada uma análise do comportamento considerando a reconfigurabilidade do sistema. Pode-se observar na FIGURA 25 o circuito utilizado para reconfiguração dos PAs. Foi simulado o sistema inicialmente com os quatro PAs habilitados chegando à configuração de apenas um PA habilitado.

FIGURA 25 - RECONFIGURAÇÃO DOS PAs

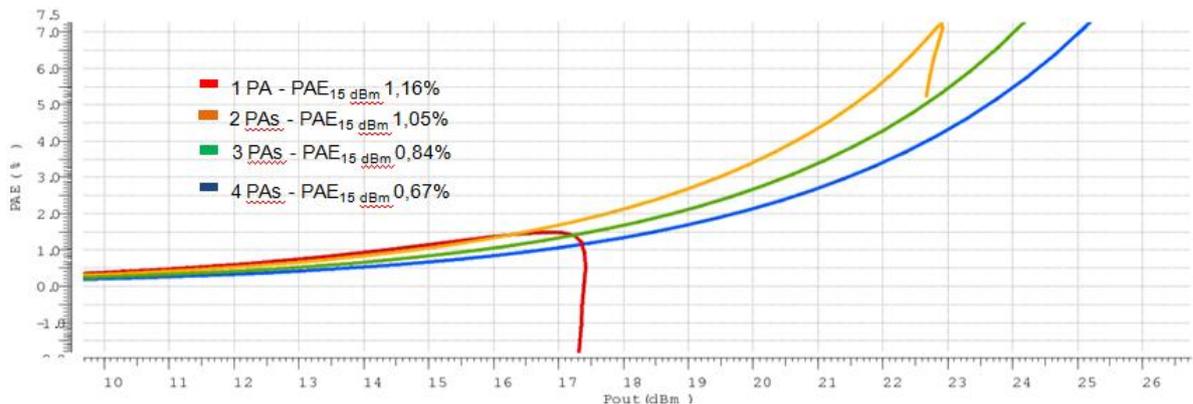


FONTE: O autor (2017)

Para validação, uma das simulações realizadas foi analisar o comportamento da eficiência pela potência de saída. Para baixas potências de saída, a eficiência de apenas um PA é superior até mesmo a uma configuração com associação de PAs, devido ao consumo ser menor para apenas um PA. Este comportamento pode ser observado na FIGURA 26 que, para uma saída de 15 dBm, a eficiência de apenas

um PA é de 1,16 % representando quase o dobro da eficiência da associação de quatro PAs que foi de 0,67 %. Mas esse comportamento é alterado conforme a potência de saída é elevada, pois com a associação de PAs são alcançadas potências de saídas maiores, aumentando a eficiência.

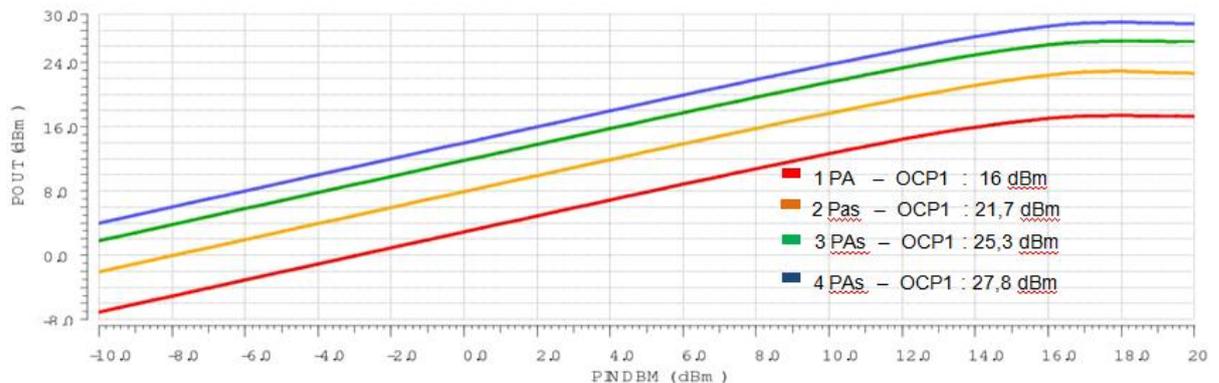
FIGURA 26 - SIMULAÇÃO DA EFICIÊNCIA PARA PAs RECONFIGURÁVEIS



FONTE: O autor (2017)

Com o intuito de validar esta característica de reconfigurabilidade do sistema, foi realizada a simulação para avaliar o ponto de compressão de 1 dB. Conforme a FIGURA 27 a associação de 4 PAs obteve 27,8 dBm, e com apenas 1 PA obteve 16 dBm. Estes valores estão abaixo da referência devido ao casamento de impedância não estar adaptado para cada configuração. Este casamento de impedância está adaptado para a associação de 4 PAs, qualquer outra associação diferente desta, resultará em valores aquém do estimado.

FIGURA 27 - VARIAÇÃO DE OCP_{1dB} PARA PAs RECONFIGURÁVIES



FONTE: O autor (2017)

5. CONCLUSÃO

O transformador utilizado em todas os combinadores simulados apresentou o melhor valor para IL_m , de 1,06 dB. O combinador de duas entradas apresentou um OCP_{1dB} de 25,3 dBm, com uma perda de inserção de 1,1 dB. No projeto dos combinadores de potência com a associação de transformadores, foram utilizadas as técnicas de espaçamentos e rotação angular entre as bobinas vizinhas, com o intuito de diminuir a influência do acoplamento magnético negativo entre enrolamentos adjacentes. Para o melhor resultado o espaçamento foi de 30 μm e um ângulo de 30°.

Tanto para avaliar o transformador como o combinador, foi utilizada a métrica IL_m , obtendo para os dois combinadores projetados 1,60 dB e 1,78 dB. O combinador com maior valor de IL_m , que possui um único combinador de quatro entradas, não combinou corretamente as potências dos PAs diferenciais, devido a necessidade de melhorar o casamento de impedância entre o PA e o combinador, resultando em um OCP_{1dB} de 23,4 dBm. Para a configuração que obteve a menor perda de inserção, formada por dois combinadores de duas entradas, associando corretamente as potências, obteve um OCP_{1dB} de 27,8 dBm. O ponto de compressão de 1 dB foi o parâmetro de avaliação da combinação das energias.

O presente trabalho atingiu com o objetivo final, de somar as potências de 4 PAs, obtendo uma potência de saída de aproximadamente 800 mW. Com esta associação, teoricamente deveria quadruplicar a potência, mas aproximadamente 200 mW foram dissipados devido a IL_m e o casamento de impedância.

Como trabalho futuro, uma melhoria no casamento de impedâncias faz-se necessário para poder adquirir a máxima potência transmitida. Aplicar técnicas para melhorar o fator de qualidade e acoplamento magnético dos transformadores, para minimizar a perda de inserção.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASHRAF, H. M.; ABBAS, G.; ALI, U.; REHMA, S. Modeling and Simulation of Optical Current Transformer using Operational Amplifiers. **IEEE Conference Publications**, Março, 2017

CARDONA, D; BOTERO, J; OSPINA, D; Handoff Management for Smart Access Points in IEEE 802.11 Networks. **IEEE Conference Publications**, Outubro, 2017.

CISCO Visual Networking Index: Global Mobile Data Traffic Forecast Update, 2016–2021. Disponível em: <<https://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/service-provider/visual-networking-index-vni/mobile-white-paper-c11-520862.html>> Acessado em 2 nov. 2017.

DENG, L. A. A. S.; **Simulação e projeto de combinadores de potência integrados.2017**. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal do Paraná. Curitiba

LEITE, B. **Design and modeling of mm-wave integrated transformers in CMOS and BiCMOS technologies**. 22 de Novembro de 2011. 161f. Tese (Doutorado Faculdade de Ciências Ciências Físicas e Engenharia), L'UNIVERSITÉ BORDEAUX 1, 2011.

LIU, G; HALDI,P; LIU,K; NIKNEJAD,A. Fully Integrated CMOS Power Amplifier With Efficiency Enhancement at Power Back-Off. **IEEE JOURNAL OF SOLID-STATE CIRCUITS**, MARCH 2008. VOL. 43, NO. 3.

LUDWIG, R. & BRETCHKO, P. **RF Circuit Design Theory and Applications**. Prentice Hall, Inc, 2000.

MOHAN S. S., HERSHENSON M. M., BOYD S. P., LEE T. H., Simple Accurate Expressions for Planar Spiral Inductances, **IEEE JOURNAL OF SOLIDSTATE CIRCUITS**, October 1999.

MOISIADIS, Y; NIKELIS, k.; PAPADOPOULOS, P. A Methodology for Integrated Transformer Compact Modeling. **IEEE Conference Publications**. Maio, 2017

NIKNEJAD , A. **Electromagnetics for High-Speed Analog and Digital Communication Circuits**. 1. Ed. New York. Cambridge University Press. 2007

PAK, J. S.; CHO, J.; KIM, J.; LEE, J.; LEE, H.; PARK, K.; TSV Mutual Inductance Effect on Impedance of 3D Stacked On-Chip PDN with Multi-TSV Connections. **IEEE Conference Publications**, Ago, 2010

PYE, A. D; HELLA, M. M. Analysis and Optimization of Transformer-Based Series Power Combining for Reconfigurable Power Amplifiers. **IEEE TRANSACTIONS ON CIRCUITS AND SYSTEMS**. Jan, 2011. VOL. 58, NO. 1.

SANTOS, F. **AMPLIFICADOR DE POTÊNCIA CMOS EM 2.4 GHZ COM POTÊNCIA DE SAÍDA PROGRAMÁVEL**. 2016. 91f. Dissertação (Mestre em Engenharia Elétrica), Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2016.

SILVA, R; **Simulação e projeto de indutores integrados em tecnologia para circuitos de radiofrequência**. 2017.105f. Dissertação (Mestre em Engenharia Elétrica), Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2017.

VANUKURU, V. N. R.; GROVES, R. Layout Optimized Non-Uniform Series-Parallel Inductors for High Inductance Density and Quality Factor. **IEEE Conference Publications**. Jun, 2015

ZHAO, D; REYNAERT, P. A 60-GHz Dual-Mode Class AB Power Amplifier in 40-nm CMOS. **IEEE JOURNAL OF SOLID-STATE CIRCUITS**, Outubro 2013, VOL. 48, NO. 10.