

# Pré-distorção Analógica aplicada a um Amplificador de Potência CMOS com OCP1 de 21,6 dBm

William Machado Araujo<sup>1,2</sup>, Casagrande Borba<sup>1,2</sup>,

Bernardo Leite<sup>1,2</sup>,

<sup>1</sup>Group of integrated circuits and systems (GICS) 1, Curitiba, Brasil

<sup>2</sup>Universidade Federal do Paraná (UFPR) 2, Curitiba, Brasil

Williamachado04@gmail.com

**Resumo**—O objetivo deste trabalho é aumentar a linearidade de um amplificador de potência (PA) de radiofrequência (RF) utilizando uma pré-distorção analógica, operando na frequência de 2,45 GHz. Com o intuito de realizar uma pré-distorção o circuito foi dividido em dois blocos funcionais, sendo eles: estágio de distorção e estágio de potência. Estabelecendo, inicialmente, que o estágio de potência sendo um amplificador de potência classe AB, escolheu-se o estágio de distorção como um PA classe C. Utilizando esta configuração, foi possível alcançar o objetivo proposto sem que ocorresse uma diminuição significativa da eficiência de potência adicionada (PAE). O amplificador de potência original teve um ganho de 24 dB e uma PAE no ponto de compressão de 1 dB (OCP1), aproximadamente 12,0 % com um valor de pico de 24,1%, tendo, para ele, um OCP1 de 18 dBm e uma potência de saturação (Psat) de 23,2 dBm. Após a pré-distorção, o PA registrou um ganho de 22 dB, uma PAE no ponto de compressão de 20,9 %, com seu valor de pico em 22,8%, apresentou uma Psat de 23,3 dBm e o OCP1 foi para 21,6 dBm, representando, então, um aumento de 3,6 dBm na linearidade do sistema. Os resultados mostram que o sistema com pré-distorção apresenta maior linearidade, sem degradar significativamente a sua eficiência.

## I. INTRODUÇÃO

A comunicação vem evoluindo no decorrer dos tempos, sendo uma das ferramentas utilizadas para o desenvolvimento da sociedade. Na atualidade, uma das maneiras mais praticadas para se comunicar, é através de dispositivos móveis [1]. Estes por sua vez, necessitam de um sistema para sobrelevar a potência do sinal para tal realização. Tendo como um dos principais blocos o amplificador de potência (PA), [2].

Idealmente, um amplificador de potência possui uma alta linearidade e eficiência. Contudo, em projetos usando PAs, é necessário realizar um equilíbrio entre os seus principais parâmetros, sendo eles: linearidade, eficiência, ganho e estabilidade. O amplificador de potência real,

apresenta diferentes características, dependendo de como é utilizado. Sendo possível separá-las em classes diferentes. Havendo, dentro dessa divisão, as classes A, AB, B e C que apresentam alta linearidade [3].

São utilizados diferentes métodos para melhorar as características do PA, dentre elas, a pré-distorção analógica, que é usada para aumentar a linearidade do sistema [4]. Para que esse aumento seja realizado, utilizam-se duas classes de operação com características de saída inversas. Os amplificadores são ligados em cascata utilizando; no primeiro estágio, um PA em uma classe C, atuando como pré-distorção, e; no segundo estágio, um PA configurado em uma classe com boa linearidade. É mostrado na Fig 1, uma representação desse método [3].

Ao final, obtém-se, como resultado, um sinal que apresenta uma associação entre os aspectos de cada classe utilizada nessa configuração. Ao se analisar as diferentes classes de operação possíveis, identificam-se as particularidades apresentadas pelas classes AB e C, em que a classe AB apresenta uma compressão do ganho após a região linear e a classe C apresenta, inicialmente, uma expansão do ganho e só depois uma compressão, fazendo com que esses dois regimes de operação sejam, em conjunto, os melhores possíveis para essa aplicação.

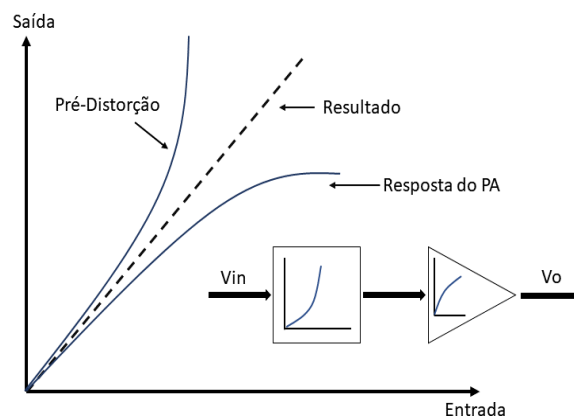


Fig. 1. Representação da pré-distorção.

## II. PROJETO DO PA

### A. Amplificador

O amplificador de potência utilizado nesse trabalho foi projetado na tecnologia CMOS de 130 nm, na topologia cascode. Nesta etapa, o dimensionamento dos componentes ativos e passivos foram determinados a partir de diferentes simulações de pequeno e grande sinais, de forma a alcançar o melhor funcionamento para o PA nas diferentes classes de operação [5]. A topologia do amplificador projetado é mostrada na Fig 2.

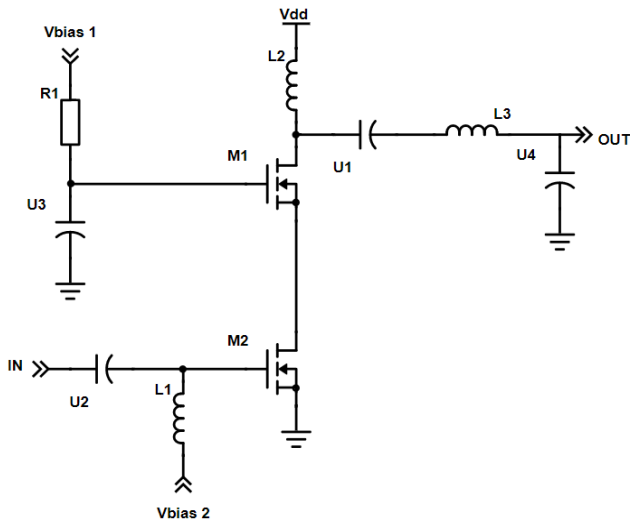


Fig. 2. Esquemático do amplificador [5].

TABELA 1. PARÂMETROS DOS COMPONENTES PASSIVOS.

	Valor	Comprimento (μm)	Largura (μm)	Nº de voltas
C1	1,96 pF	25	77,87	-
C2	1,96 pF	25	77,87	-
C3	8,80 pF	92	95,4	-
C4	916,98 pF	25	36,37	-
R1	999,96 Ω	101,88	5,92	-
L1	572 pH	128,86	10	2
L2	900 pH	166,54	10	2
L3	2,2 nH	210	10	3

TABELA 1. PARÂMETROS DOS COMPONENTES ATIVOS.

Parâmetros	PA classe C		PA classe AB	
	600 μ	600 μ	2,28m	1,12m
Largura (m)	600 μ	600 μ	2,28m	1,12m
Comprimento (nm)	240	120	240	120
Números de dedos	20	56	114	56
Multiplicidade	2	2	2	2

Na Tabela 1, é mostrada a configuração dos componentes passivos, enquanto a Tabela 2, mostra a

configuração dos componentes ativos. Para a melhor utilização do amplificador, foram necessárias alterações na largura de canal dos transistores no PA classe C de forma a torná-lo mais eficiente.

Uma das principais preocupações na etapa de projeto, foi a eficiência de potência adicionada (PAE), tendo em vista que esse fator viria a ter uma redução pelo acréscimo de um novo estágio, que apresenta uma potência consumida para seu funcionamento. Para que pudéssemos reduzir esse consumo, trabalhou-se na diminuição dos parâmetros ativos desse amplificador, visto que poderíamos diminuir a corrente nos transistores. A medida adotada foi a redução da largura de canal dos transistores, de uma maneira a obter o mesmo funcionamento sem tal consumo. O melhor valor que satisfaz esse comportamento foi de 600 μm para ambos os transistores. Contudo, trabalhou-se também na tensão de alimentação do PA, visto que essa medida tem uma relação direta com a potência, essa diminuição foi de 0,8V comparado a tensão de alimentação do PA classe AB, estabelecendo a nova tensão para o PA classe C em 2,5 V.

### B. Estágio de Pré-distorção

Com o objetivo de realizar o método de pré-distorção analógica para melhorar a linearidade do sistema, realizou-se variações nas tensões de polarização, para poder escolher a melhor característica para fazer a compensação dos sinais. Sabendo-se que com diferentes tensões de polarizações, obtém-se diferentes características para a mesma classe de operação.

Inicialmente, para obtenção dessas medidas foi necessário encontrar a faixa de tensão que proporcionaria uma operação do amplificador na classe C, visto que os valores para classe AB foram pré-determinados em [5]. Isso se deu, mantendo o valor de Vbias 2 constante e variando Vbias 1, que representam as tensões de polarização do amplificador. Após essa varredura de valores foi necessário a união dos estágios afim de averiguar o comportamento da união dos sinais de ambos estágios, até obter os melhores resultados para o sistema. Na Fig 3, observa-se o diagrama de blocos ilustrativo referente a montagem do sistema de pré-distorção.

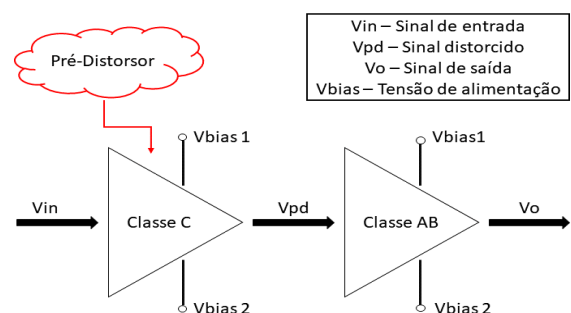


Fig. 3. Diagrama de blocos de uma pré-distorção.

Isso foi realizado, de maneira a obter a melhor união dos sinais de saída, para se ter um aumento na linearidade do sistema. Os valores que otimizam cada um dos blocos

foram: para classe AB, valores tais de  $V_{bias 1} = 525$  mV e  $V_{bias 2} = 2,7$  V, e os melhores valores para classe C foram de  $V_{bias 1} = 270$  mV e  $V_{bias 2} = 3,3$  V. Conseqüentemente, esses valores proporcionam um bom casamento dos sinais entre os estágios, e assim, um aumento da linearidade. Esses valores são mostrados na Tabela 3, juntamente com a tensão de alimentação de cada estágio. Apesar de uma pré-distorção analógica não possuir uma união ideal, igual a uma pré-distorção digital, onde é possível a realização desse casamento de uma forma mais aproximada ao ideal, o resultado foi satisfatório. Essa combinação não é realizada de forma ideal, visto que a não idealidade dos amplificadores, proporcionam pequenas diferenças no sinal de saída, fazendo que os sinais não sejam perfeitamente o inverso um do outro.

Tabela 3. Tensão de polarização e alimentação dos amplificadores.

Tensão de polarização	Vbias 1 (mV)	Vbias 2 (V)	Tensão de Alimentação (V)
PA classe C	270	3,3	2,5
PA classe AB	525	2,7	3,3

### III. RESULTADOS

O circuito proposto foi construído e simulado usando o software *Cadence Specter RF*, utilizando a frequência de 2,45 GHz. Tendo como, principal objetivo deste trabalho aumentar a linearidade de um amplificador de potência classe AB, a linearidade foi analisada pelo parâmetro do ponto de compressão de 1dB (OCP1), que nos apresenta o valor da potência de saída que o amplificador deixa sua região linear. Com essa finalidade, fez-se comparações entre os PAs sem e com pré-distorção, para estimar qual foi o aumento utilizando este método. Na Fig 4, é possível visualizar os gráficos dos ganhos para o PA original e com pré-distorção.

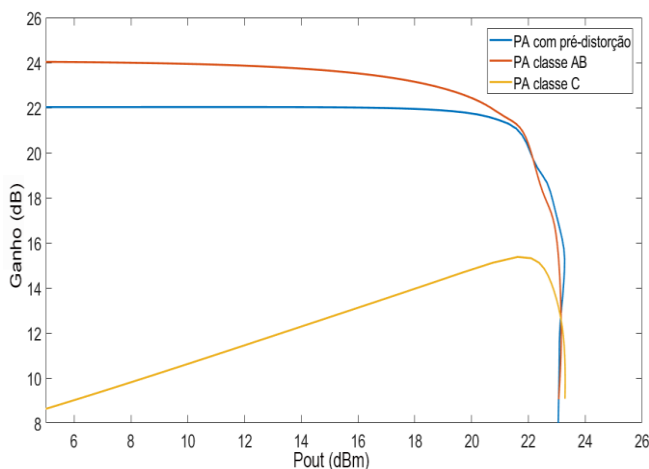


Fig. 5. Ganho em função da potência de saída em 2,45 GHz para os estágios individuais e para o amplificador com pré-distorção.

Inicialmente, o OCP1 localizava-se para o amplificador sem pré-distorção em 18 dBm, tendo, para isso, um ganho de aproximadamente 24 dB e uma potência de saturação ( $P_{sat}$ ) em 23,2 dBm, após o incremento do estágio de distorção, essas medidas foram para 21,6 dBm, e 22 dB e 23,3 dBm respectivamente. Com esses valores, conseguimos, então, um aumento de 3,7 dBm no OCP1, que por sua vez, representa o aumento da linearidade. Tendo para isso, uma redução de 2 dB no ganho do sistema final

Para analisar a PAE, fez-se também uma comparação da PAE no valor de pico e no OCP1, entre o amplificador original e o sistema com pré-distorção. Na Fig 5, é possível visualizar o gráfico da PAE para o amplificador original e para o sistema com pré-distorção. A PAE no valor de pico apresentou uma redução de aproximação de 1,3% p.p., tendo esse valor inicialmente em 24,1% e após a pré-distorção estabelecendo-se em 22,8%. O valor da PAE no valor de pico apresentou um aumento de 8,9%, visto que o OCP1 apresentou um aumento, e isso proporcionou um deslocamento desse parâmetro, e assim, se deslocou para 20,9% tendo seu valor inicial em 12%.

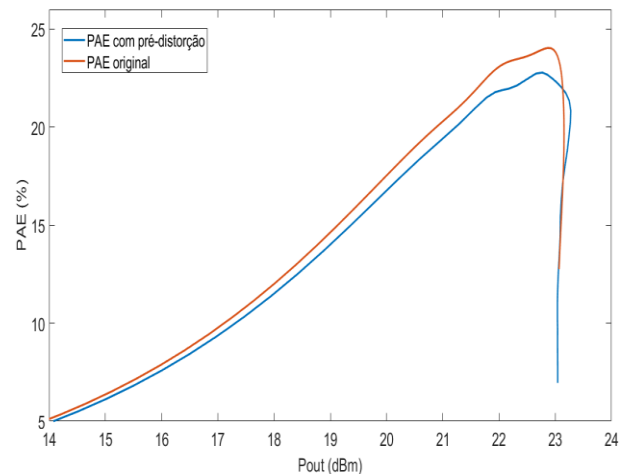


Fig. 4. Comparação da PAE para o sistema com e sem pré-distorção, operando em 2,45 GHz.

Outro aspecto avaliado dentro do amplificador, é a estabilidade. Este parâmetro é um fator crítico na análise, pois os PAs são potencialmente instáveis. Qualitativamente ele é representado pelo parâmetro  $\mu$ . Caso ele seja maior que 1 para as frequências de interesse, o sistema é incondicionalmente estável. Conforme a modificação do valor da carga de saída. Inicialmente não era alcançado pelo PA classe AB a estabilidade incondicional, tendo faixas que esse parâmetro apresentava valores baixos de 1, mas para o valor específico de 50  $\Omega$  de carga o PA apresentava a característica de estável. Utilizando essa definição de estabilidade incondicional, tem-se que o sistema de pré-distorção é incondicionalmente estável, por não ter apresentado uma região em que o valor  $\mu$  estivesse abaixo do valor de referência. Na Fig 6, é possível analisar a estabilidade para uma faixa de 0 hz até 5 Ghz, podendo visualizar que o parâmetro  $\mu$  para frequências baixas

apresenta uma convergência para o valor 1 e para frequência mais alta uma divergência.

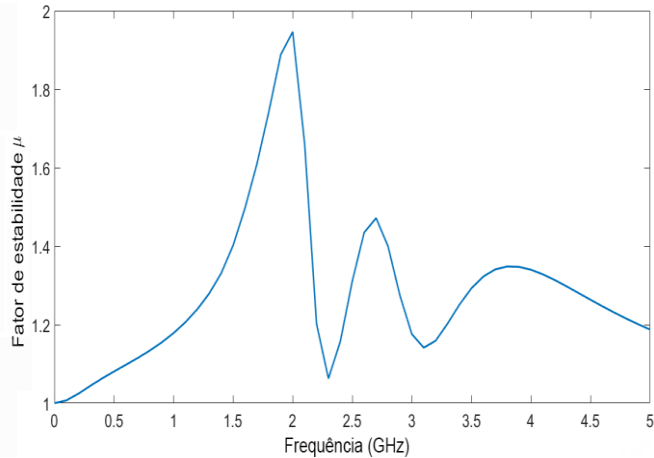


Fig. 6. Gráfico da estabilidade para uma faixa de frequência de 0 Hz até 5 GHz.

O parâmetro S11 também foi analisado. Esse valor representa quanto da energia fornecida é refletida de volta para a entrada, mostrando a qualidade da correspondência de impedância de entrada, essa medida apresenta melhores resultados tendo um valor mais longe possível do valor zero. Pode-se observar, na Fig 7, a variação deste parâmetro em função da frequência.

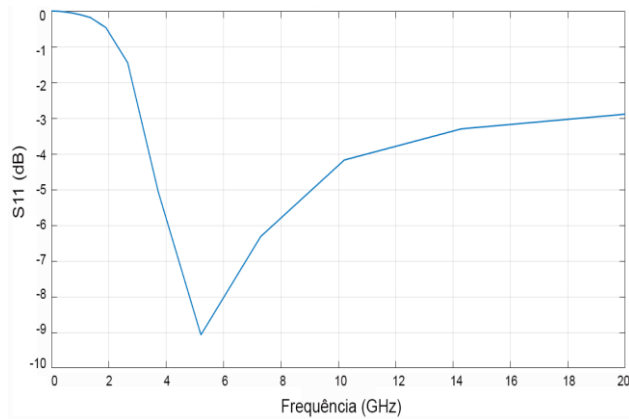


Fig. 7. Gráfico da estabilidade para uma faixa de frequência

Tabela 4. Comparação dos principais resultados.

Parâmetros	PA original	PA com pré-distorção
OCP1 (dBm)	18	21,6
Potência de saturação (dBm)	23,2	23,3
PAE no ponto de compressão de 1 dB (%)	12	20,9
Valor de pico da PAE (%)	24,1	22,8
Ganho (dB)	24	22

Em 2,45 GHz, o S11 está próximo de 0, o que revela uma baixa qualidade da característica em questão, tendo esse parâmetro deslocado para a frequência de 4,5 GHz por estar o mais longe do valor zero.

Para efeitos de comparação realizou-se uma comparação dos principais resultados adquiridos neste trabalho. Na Tabela 4, é mostrado tais medidas tendo elas o PA sem e com pré-distorção.

#### IV. CONCLUSÃO

O principal objetivo desse trabalho, foi projetar um sistema que otimizasse a linearidade de um amplificador de potência, sem que houvesse a provocação da diminuição de forma significativa da eficiência, visto que, com uma linearidade maior, se torna possível a transmissão de dados sem a ocorrência de distorção do sinal de entrada para maiores potências.

Os resultados mostram que um sistema com pré-distorção satisfaz o aumento da linearidade, tendo para isso, uma redução de alguns parâmetros, mas mantendo a qualidade adequada para uso.

De forma geral, o sistema projetado alcançou um ótimo aumento na linearidade do sistema chegando a 3,6 dBm de aumento, comparado ao PA original. Para isso ocorreu uma diminuição na PAE do sistema, uma vez que, com o acréscimo de um novo estágio, ocorrerá um maior consumo para o funcionamento. Esse sistema também apresentou uma estabilidade de funcionamento para carga utilizada.

#### AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq pelo suporte financeiro.

#### REFERÊNCIAS

- [1] F. SANTOS, A. A. MARIANO, B. LEITE. "2.4 GHz CMOS digitally programmable power amplifier for power back-off operation", 2016 IEEE 7th Latin American Symposium on Circuits & Systems (LASCAS).
- [2] V. A. CARAZZA, J. G. S. SANTOS, E. C. R. Da COSTA, M. A. ROCHA, U. S. DIAS, "Sistema de Medição e Análise de Qualidade de Redes Celulares Móveis.", 2017 - XXXV simpósio Brasileiro de Telecomunicações e Processamento de sinais.
- [3] T. H. LEE. "The design of CMOS radio-frequency integrated circuits". Cambridge university press, 2 edition, 2004.
- [4] W. AHMAD, L. XU, M. TÖRMÄNEN and H. SJÖLAND. "A Fully Integrated 26dBm Linearized RF Power Amplifier in 65nm CMOS Technology.", 2013, IEEE School of Electrical and Information Engineering, Jiangsu University, China.
- [5] G. BORBA, A. MODESTO, B. LEITE, A. MARIANO, "Fully integrated dual-mode RF CMOS power amplifier design", 18th Microelectronics Students Forum (SForum), Bento Gonçalves, 2018.

