

MODELAGEM E LINEARIZAÇÃO DE AMPLIFICADORES DE POTÊNCIA BASEADAS NO PRODUTO DE TABELAS DE BUSCA

Victor Lopes Gabriel¹ e Eduardo G. Lima²

Grupo de Circuitos e Sistemas Integrados, Universidade Federal do Paraná^{1,2},
Curitiba, Brasil
victorgabriel@ufpr.br

Resumo — Ao se trabalhar em aplicações de radiofrequência deseja-se utilizar o amplificador de potência (PA) no máximo de sua eficiência enquanto simultaneamente apresenta características lineares. Isso vem se tornando um grande desafio, pois o espectro de frequências disponíveis está cada vez mais apertado. Dentre os métodos para utilizar o PA na sua região mais eficiente (menos linear) o estudado será o da pré-distorção, no qual o sinal passa por um bloco que realiza a operação inversa à não-linearidade aplicada por este. Para tanto, primeiro se faz necessário caracterizar o amplificador através de um modelo matemático capaz de descrever o comportamento não-linear. Serão abordados dois modelos: o polinômio de memória generalizada (GMP) e um modelo desenvolvido neste artigo. Primeiramente, foram estruturadas as regras de formação das matrizes de entradas, essas matrizes representam combinações polinomiais de distintos momentos de tempo do sinal de entrada. Em seguida, foram gerados algoritmos de formação dessas matrizes em Matlab. Por fim, foram utilizadas a métrica do erro quadrático médio normalizado (NMSE) e a complexidade dos polinômios para fazer uma comparação entre os métodos. Ambos os modelos desenvolvidos tem como base uma equação polinomial com memória, ou seja, apontam que o PA apresenta características de um sistema causal com memória. As equações matriciais obtidas foram implementadas em Matlab gerando códigos parametrizáveis que permitem a configuração da simulação pelos truncamentos de memória e grau polinomial. O script desenvolvido gera gráficos comparativos grau-memória-erro quadrático médio em decibel. A partir de dados coletados de um PA GaN operando em classe AB pode-se concluir que o modelo novo obtém resultados similares ao modelo GMP para os dados de teste e o algoritmo de ajuste não linear utilizados.

I. INTRODUÇÃO

Com o desenvolvimento da *internet* das coisas o espectro de frequência vem ficando cada vez mais poluído, o que dificulta a introdução de novos equipamentos nesse âmbito. Uma possível solução é o melhor aproveitamento da banda existente com transmissores mais lineares e que por consequência

transbordam menos a faixa de frequência utilizada. Para desenvolver um amplificador mais linear são possíveis diversas abordagens de *Hardware*, *Software* e *Firmware*. Em *Hardware* podemos considerar circuitos mais eficientes espectralmente falando e equipamentos com calibragem mais seletiva. Já em *Software* e *Firmware* pode-se considerar uma abordagem em relação à correção das não linearidades através, por exemplo, de pré-distorção. A pré-distorção consiste em, conhecendo a característica não-linear aplicada pelo amplificador de potência, inserir uma não-linearidade inversa à aplicada por este. Um primeiro passo para se confeccionar um algoritmo de pré-distorção é a caracterização do sistema e um estudo sobre a resposta do amplificador de potência ao sinal de entrada. Essa caracterização deve necessariamente levar em conta características não-lineares e temporais do sistema. Dentre as diferentes caracterizações possíveis um modelo que merece atenção é o modelo polinomial com memória, pois é capaz de descrever tanto as não linearidades quanto o efeito causal do sistema.

Neste trabalho são estudados diferentes modelos polinomiais com memória a fim de identificar a relação custo-benefício de processamento dos dados em uma transmissão de radiofrequência.

II. DESENVOLVIMENTO

A. Revisão da Literatura

As referências apontadas ao final deste trabalho indicam a familiarização com o tema no início dos trabalhos, num primeiro momento foram estudados o funcionamento de um sistema de transmissão em radiofrequência, a modelagem e o funcionamento de um amplificador de potência e as ferramentas matemáticas necessárias para adaptar os modelos propostos a uma abordagem computacional [1]-[11].

B. Desenvolvimento

Os estudos foram desenvolvidos no *software Matlab*. Os dados de teste utilizados foram medidos a uma frequência de amostragem de 61,44 MHz, usando um

analisador vetorial de sinais, na entrada e na saída de um PA fabricado em tecnologia GaN, operando em classe AB e estimulado por uma portadora de 900 MHz modulada por uma envoltória WCDMA de largura de banda de 3,84 MHz.

Já nos procedimentos, primeiramente as equações foram estudadas e expandidas para facilitar o entendimento da regra de formação das matrizes X utilizadas em ambos os modelos. Essas matrizes representam diferentes combinações polinomiais de distintos momentos de tempo do sistema de entrada. Em seguida, foram escritos os algoritmos de formação dessas matrizes e esses algoritmos foram aplicados em *Matlab* a fim de gerar um *script* executável para validar os resultados. Por fim, já com os *scripts* funcionais, foi utilizada a métrica NMSE (1) assim como a complexidade dos polinômios e quantidade de coeficientes para fazer uma comparação quantitativa entre os métodos e definir a executabilidade do método novo estudado.

$$NMSE = \frac{1}{n} \sum_i \frac{(P_i - M_i)^2}{\bar{P}\bar{M}} \quad (1)$$

$$\bar{P} = \frac{1}{n} \sum_i P_i \quad (1.1)$$

$$\bar{M} = \frac{1}{n} \sum_i M_i \quad (1.2)$$

Sendo P o valor predito e M o valor medido.

C. Resultados e Discussão

Ambos os modelos desenvolvidos tem como base uma equação polinomial com memória, ou seja, apontam que o PA apresenta características de um sistema causal com memória. A seguir serão apresentadas as equações dos modelos GMP (2) e Novo (4) em sua forma de somatórios e matricial (GMP (3), Novo (5)):

$$\tilde{y}(n) = \sum_{m_1=0}^M \tilde{x}(n-m_1) \left[\left[\sum_{p=0}^P \sum_{m_2=0}^M h_{p,m_1,m_2} |\tilde{x}(n-m_2)|^p \right] [1] \right] \quad (2)$$

$$\tilde{\underline{Y}} = \left[\tilde{\underline{X}} \cdot \tilde{\underline{H}} \right] \quad (3)$$

$$\tilde{y}(n) = \sum_{m_1=0}^M \tilde{x}(n-m_1) \left[\left[\sum_{p_1=0}^P \sum_{m_2=0}^M h_{p_1,m_2} |\tilde{x}(n-m_2)|^{p_1} \right] \left[\sum_{p_2=0}^P h_{p_2,m_1} |\tilde{x}(n-m_1)|^{p_2} \right] \right] \quad (4)$$

$$\tilde{\underline{Y}} = \left[\tilde{\underline{X}}_1 \cdot \tilde{\underline{H}}_1 \right] \cdot \left[\tilde{\underline{X}}_2 \cdot \tilde{\underline{H}}_2 \right] \quad (5)$$

Nas Equações, y e x referem-se respectivamente à saída e à entrada do sistema, h_n são os coeficientes dos polinômios, m é a memória enquanto M é o truncamento da memória e p é a ordem do polinômio enquanto P é o truncamento deste. O símbolo de '~' sobre um termo o caracteriza como sendo complexo e os traços sob os

termos indicam se esse é um vetor ou uma matriz (um e dois traços respectivamente).

As equações matriciais obtidas foram implementadas em *Matlab* gerando códigos parametrizáveis que permitem a configuração da simulação pelos truncamentos de memória e grau polinomial. Os resultados obtidos são apresentados nas Figuras 1-6.

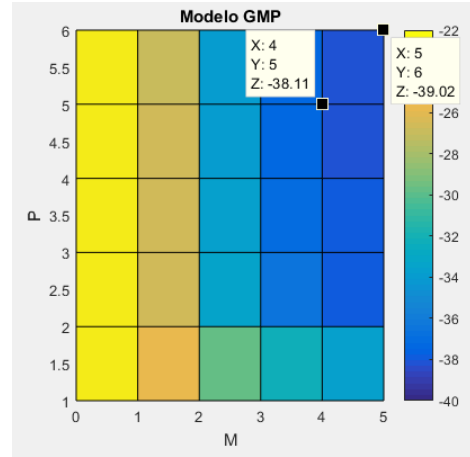


Fig. 1. Comparação da métrica NMSE(dB) para o modelo GMP

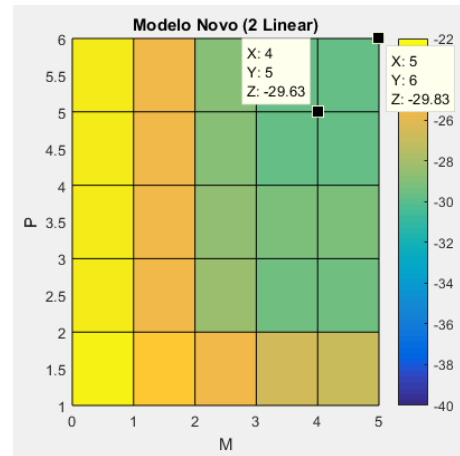


Fig. 2. Comparação da métrica NMSE(dB) para o modelo Novo utilizando duas vezes o método linear para obter os coeficientes

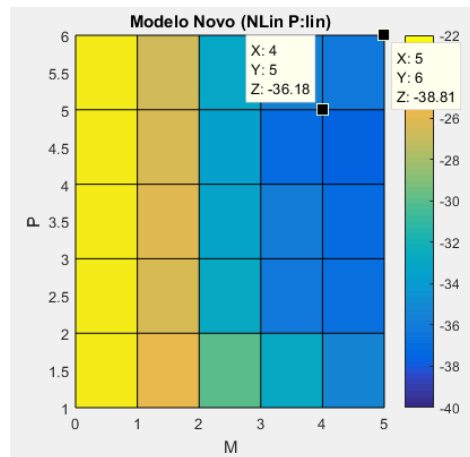


Fig. 3. Comparação da métrica NMSE(dB) para o modelo Novo utilizando o método não Linear para obter os coeficientes com ponto de partida os coeficientes obtidos no método anterior

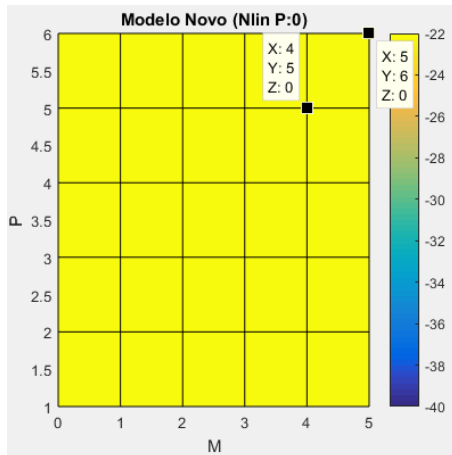


Fig. 4. Comparação da métrica NMSE(dB) para o modelo Novo utilizando o Método não Linear para obter os coeficientes com ponto de partida os mesmos em 0

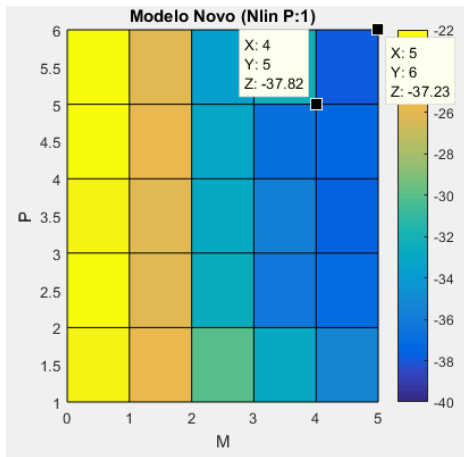


Fig. 5. Comparação da métrica NMSE(dB) para o modelo Novo utilizando o Método não Linear para obter os coeficientes com ponto de partida os mesmos em 1

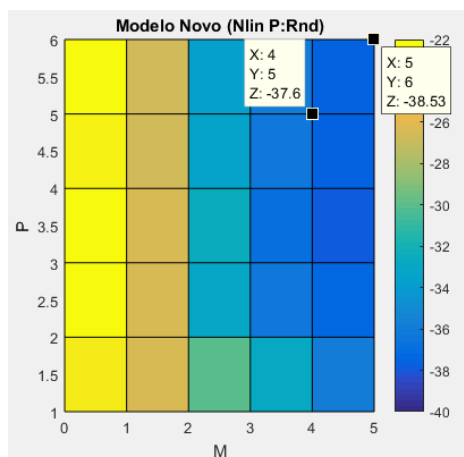


Fig. 6. Comparação da métrica NMSE(dB) para o modelo Novo utilizando o Método não Linear para obter os coeficientes com ponto de partida os mesmos em distribuição aleatória

Nas Figuras 1-6 temos o eixo vertical de cada gráfico representando o grau polinomial da equação em questão e no eixo horizontal o tamanho da memória deste polinômio. Já a escala de cores representa o erro quadrático médio em escala de decibel, sendo as cores mais quentes erros maiores e as cores mais frias erros menores.

Tendo como base de comparação a figura 1 pode-se inferir o seguinte dos resultados:

- Utilizar duas vezes um método linear para aproximar uma equação não linear gera um resultado menos preciso que a base puramente linear (figura 2).

- Utilizar um método não linear para obter os coeficientes do modelo também não linear gera resultados similares à base (figuras 3, 5 e 6).

- Quando o ponto de partida do modelo não linear é composto inteiramente de zeros o método não converge (figura 4).

III. CONCLUSÃO

A partir dos dados obtidos nessa primeira etapa pode-se concluir que o modelo novo obtém resultados similares ao modelo GMP para os dados de teste e o algoritmo de ajuste não linear utilizados. Em desenvolvimentos futuros deve-se buscar mais profundamente as vantagens e desvantagens de cada método de linearização para definir qual será implementado em *Hardware*.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio financeiro do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

REFERÊNCIAS

- [1] ABDELHAFIZ, A. et al. Digital predistortion of lte-a power amplifiers using compressed-sampling-based unstructured pruning of volterra series. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, IEEE, v. 62, n. 11, p. 2583-2593, 2014.
- [2] BELABAD, A. R.; MOTAMEDI, S. A.; SHARIFIAN, S. A novel generalized parallel twobox structure for behavior modeling and digital predistortion of rf power amplifiers at lte applications. *Circuits, Systems, and Signal Processing*, Springer, p. 1-22, 2017.
- [3] BOLDRINI, J. L. et al. *Álgebra linear*. [S.l.]: Harper & Row, 1980
- [4] BONFIM, E. J.; LIMA, E. G. de. A modified two dimensional volterra-based series for the low-pass equivalent behavioral modeling of rf power amplifiers. *Progress In Electromagnetics Research*, EMW Publishing, v. 47, p. 27-35, 2016.
- [5] HAYKIN, S. *Sistemas de comunicação*. [S.l.]: Bookman, 2004.

- [6] KIM, J.; KONSTANTINOU, K. Digital predistortion of wideband signals based on power amplifier model with memory. *Electronics Letters, IET*, v. 37, n. 23, p. 1417-1418, 2001
- [7] MATHEWS, V. J.; SICURANZA, G. *Polynomial signal processing*. [S.l.]: John Wiley & Sons, Inc., 2000.
- [8] MORGAN, D. R. et al. A generalized memory polynomial model for digital predistortion of rf power amplifiers. *IEEE Transactions on signal processing, IEEE*, v. 54, n. 10, p. 3852-3860, 2006.
- [9] SCHUARTZ, L. Polinômios com Memória de Complexidade Reduzida e sua Aplicação na Pré-distorção Digital de Amplificadores de Potência. Trabalho de conclusão de curso ? Universidade Federal do Paraná, 2017
- [10] SCHUARTZ, L.; LIMA, E. G. Comparison among algorithms for the identification of adaptive memory polynomial predistorter models. *30o Simpósio Sul de Microeletrônica, 30o SIM, Santa Maria, RS*, p. 1-4, 2015.
- [11] WOOD, J. Digital pre-distortion of rf power amplifiers: progress to date and future challenges. In: *IEEE. Microwave Symposium (IMS), 2015 IEEE MTT-S International*. [S.l.], 2015. p. 1-3.