

Comparação Entre Três Modelos de Análise Comportamental de Amplificadores de Potência Baseados no Produto Entre Filtros e Séries Polinomiais

Lucas Vitkoski Diogo dos Santos¹, Lara Eimy Kuada²,
Eduardo Gonçalves de Lima³

^{1,2,3} Grupo de Circuitos e Sistemas Integrados, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Brasil
lucas.vitkoski@ufpr.br

Resumo — Os amplificadores de potência (PAs) são dispositivos essenciais dentro de sistemas de transmissão sem fio. Neste trabalho, foram feitas duas comparações utilizando três métodos de linearização de transmissores sem fio. A métrica utilizada como base para a comparação dos modelos foi a do erro quadrático médio normalizado (NMSE). Primeiramente, foi comparado o modelo do produto entre duas séries de Volterra, com os coeficientes da série extraídos através de otimização não linear, que resultou em uma NMSE de extração de $-31,26$ dB, com o modelo com um único filtro e múltiplas funções polinomiais (FIP+), que obteve NMSE de extração de $-31,20$ dB. Depois, será comparado novamente o modelo do produto, agora com o modelo de uma única série de Volterra, com coeficientes extraídos através do método de mínimos quadrados, que teve como resultado uma NMSE de extração $-32,64$ dB. Comparando os modelos, é possível observar que os resultados são semelhantes, com uma pequena melhora utilizando o método de uma única série de Volterra.

I. INTRODUÇÃO

Sistemas de transmissão sem fio são muito importantes no desenvolvimento de vários tipos de dispositivos de tecnologia moderna. Estes sistemas oferecem, à medida que aumentam a sua capacidade, uma variedade crescente de serviços para um número crescente de usuários, fato que exige a transferência de uma quantidade extremamente elevada de dados [1].

Sendo dispositivos muito importantes dentro dos sistemas de transmissão sem fio, os amplificadores de potência (PAs), possuem a função de amplificar a potência do sinal de radiofrequência (RF) recebido, deixando o sinal de saída com um nível de potência mais elevado [2].

Um amplificador desejável é aquele que possui alta linearidade e alta eficiência, no entanto, a maioria dos PAs não satisfaz esses critérios. Portanto, para obter um PA com

boa eficiência e garantir a linearidade do sinal amplificado faz-se necessária a utilização de alguma técnica de linearização [2].

O objetivo da modelagem comportamental do PA é identificar as diferentes dinâmicas não lineares que estão frequentemente presentes em um PA físico e sempre que possível, reduzir ao máximo o número de requisitos para sua modelagem precisa [3].

Neste trabalho, serão abordados três modelos utilizados para a linearização de transmissores sem fio: o modelo do produto entre duas séries de Volterra, com coeficientes extraídos através de otimização não linear, o modelo com um único filtro e múltiplas funções polinomiais (FIP+) e o modelo com uma única série de Volterra, com os coeficientes extraídos a partir do método dos mínimos quadrados. As características de cada um desses modelos serão abordadas nas seções II, III e IV.

Sendo a comparação entre esses modelos o objetivo principal deste trabalho, serão realizadas duas comparações, a primeira será entre o modelo do produto entre duas séries de Volterra e o modelo com um único filtro e múltiplas funções polinomiais (FIP+) e a segunda será entre o modelo do produto e o modelo que utiliza uma única série de Volterra. O critério que servirá como base para a comparação dos modelos será o resultado da métrica do erro quadrático médio normalizado (NMSE). Por fim, a seção VII trará as conclusões das duas comparações.

II. PRODUTO ENTRE DUAS SÉRIES DE VOLTERRA

A. Séries de Volterra

As séries de Volterra são capazes de reproduzir os comportamentos não lineares e de memória dos PAs, e possuem a vantagem de serem lineares em seus coeficientes, o que permite o uso de regressão múltipla [4] para a extração de seus coeficientes.

Um modelo de série de Volterra muito utilizado para a modelagem comportamental do PA, é a série de Volterra de tempo discreto passa-baixa, que descreve a relação entre envoltórias de valores complexos $x(n)$ e $y(n)$ na entrada e saída do PA, respectivamente, dado por:

$$\begin{aligned} \tilde{y}(n) &= \sum_{p=1}^P \sum_{q_1=0}^M \sum_{q_2=q_1}^M \cdots \sum_{q_p=q_{p-1}}^M \sum_{q_{p+1}=0}^M \sum_{q_{p+2}=q_{p+1}}^M \cdots \sum_{q_{2p-1}=q_{2p-2}}^M \\ &\times \tilde{h}_{2p-1}(q_1, q_2, \dots, q_{2p-1}) \prod_{j_1=1}^{2p-1} \tilde{x}(n - q_{j_1}) \\ &- q_{j_1}) \prod_{j_2=p+1}^{2p-1} \tilde{x}^*(n - q_{j_2}) \end{aligned} \quad (1)$$

Onde $2P - 1 = P_0$ é a ordem polinomial de truncamento e $\tilde{h}_{2p-1}(q_1, q_2, \dots, q_{2p-1})$ são os kernels passa-baixa equivalentes de Volterra, uma generalização da resposta de impulso passa-baixa equivalente de sistemas lineares para não lineares. A simetria dos grãos foi assumida [3].

B. Produto entre séries de Volterra

Como o número de coeficientes das séries pode se tornar extremamente alto, para reduzir o número de coeficientes, uma alternativa é utilizar o produto entre duas séries de Volterra [5].

Para o modelo de produto, foi inicialmente assumido que existe apenas uma série de Volterra, uma série idêntica à apresentada na Equação 1, ou seja, onde em cada termo a quantidade de entradas não conjugadas é sempre igual à quantidade de entradas conjugadas mais uma. O valor de P da primeira série foi fixado em 1, reduzindo-a a um filtro de memória finita. O sinal de entrada é processado pela série Volterra obtida.

Para a segunda série foi feita uma mudança na equação pois em cada termo desta segunda série de Volterra, a quantidade de entradas não conjugadas deveria ser sempre igual à quantidade de entradas conjugadas, isto é, uma parcela não conjugada foi removida em cada termo. Esta alteração é necessária para que, após a multiplicação das duas séries, cada termo do somatório que estima a saída contenha, além do produto entre 2 coeficientes, uma quantidade de entradas conjugadas que é menor que a quantidade de entradas não conjugadas em exatamente uma unidade. O diagrama de blocos do modelo pode ser observado na Fig. 1.

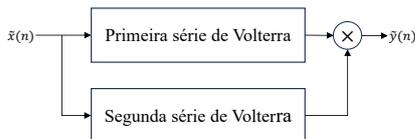


Fig. 1. Diagrama de blocos do modelo do produto entre duas séries de volterra.

C. Otimização não linear

Para encontrar os coeficientes do produto entre as duas séries de Volterra através da otimização não linear, foi utilizado um conjunto de dados previamente medidos para extração e validação e foi desenvolvida uma função baseada no produto que retorna o vetor do módulo de erro. Após validação desta função os coeficientes da série de Volterra foram obtidos através do comando *lsqnonlin* do MATLAB. Este comando permite utilizar a otimização não linear para encontrar os valores de todos os coeficientes das duas séries de Volterra de uma só vez.

III. ÚNICO FILTRO E MÚLTIPLAS FUNÇÕES POLINOMIAIS (F1P+)

Este modelo possui um único filtro e múltiplas funções polinomiais (F1P+) [6] e sua equação constituinte pode ser descrita como:

$$\begin{aligned} \tilde{y}(n) &= \left[\sum_{m=0}^M \tilde{a}_{m+1} \tilde{x}(n - m) \right] \\ &\times \left[\sum_{p=1}^P \sum_{m=0}^M \tilde{b}_{pm} |\tilde{x}(n - m)|^{2p-2} \right] \end{aligned} \quad (2)$$

Onde $\tilde{x}(n)$ é o sinal de entrada na amostra n e $\tilde{y}(n)$ é o sinal de saída na amostra n , M é a profundidade da memória, P é a ordem polinomial e \tilde{a}_{m+1} e \tilde{b}_{pm} são os coeficientes de valor complexo do modelo. O diagrama de blocos do modelo é mostrado na Figura 2.

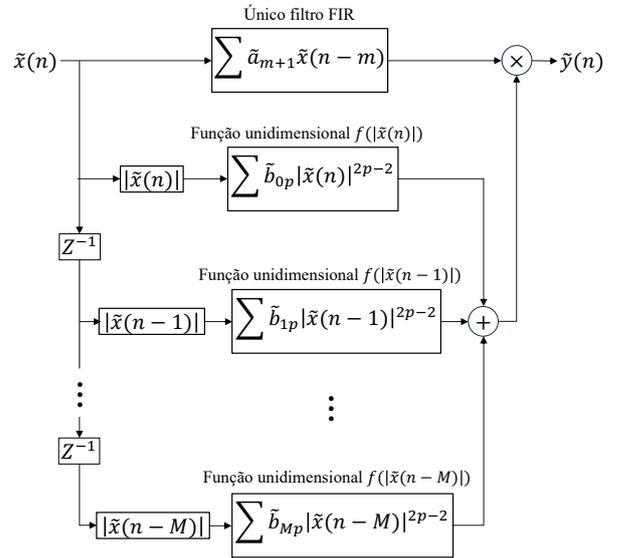


Fig. 2. Diagrama de blocos do modelo F1P+.

O parâmetro \tilde{a}_{m+1} é identificado com otimização não linear [7]. Depois, o método de mínimos quadrados pode ser utilizado para extrair o coeficiente \tilde{b}_{pm} [8].

IV. UMA ÚNICA SÉRIE DE VOLTERRA

A. Modelo utilizado

Para o modelo que utiliza uma única série de Volterra, a série escolhida foi a série de Volterra de tempo discreto

passa-baixa, a mesma utilizada para o modelo do produto, ou seja, exatamente igual a série apresentada na Equação 1.

B. Mínimos quadrados

Os coeficientes da série de Volterra deste modelo foram obtidos através do método dos mínimos quadrados [8]-[9] com o comando “\” do MATLAB.

V. VALIDAÇÃO EXPERIMENTAL

A. Conjunto de dados

Com o objetivo de validar os modelos, foram utilizados dados medidos previamente com um analisador vetorial de sinais com frequência de amostragem de 61,44 MHz. O PA medido foi fabricado em tecnologia GaN e opera em classe AB. Durante a medição, o PA foi estimulado por uma portadora em 900 MHz modulada por um sinal WCDMA de largura de banda de 3,84 MHz.

Existiam dois diferentes conjuntos de dados, o conjunto de extração (utilizado para obter os valores dos coeficientes) e o conjunto de validação (utilizado para calcular os valores de saída e validar a acurácia de cada modelo).

B. Escolha dos parâmetros P e M

A escolha dos valores de P e M foi arbitrária e para comparar os modelos os valores escolhidos foram de $P = 2$ e $M = 2$. Porém para o modelo do produto, como descrito no item B da seção II, na primeira série o valor de P foi fixado em 1.

C. Implementação dos algoritmos

Todos os algoritmos necessários foram implementados no *software* MATLAB. A otimização não linear, utilizada nos modelos do produto e de F1P+, foi realizada através do comando *lsqnonlin* e o método dos mínimos quadrados, utilizado no modelo com uma única série de Volterra, foi implementado através do comando “\”.

Para os modelos que utilizam o comando *lsqnonlin*, foram realizadas cinco simulações com valores iniciais aleatórios e foram escolhidos os conjuntos de coeficientes que produziram o menor erro segundo a métrica NMSE.

D. Comparação dos modelos através da métrica NMSE

A comparação entre os métodos foi baseada na análise da métrica NMSE [10]. O que se busca é o resultado que tenha o menor erro baseado nessa métrica, ou seja, quanto menor o valor desse indicador, mais preciso será o resultado do modelo. A NMSE é calculada por:

$$NMSE = 10 \log_{10} \left[\frac{\sum_{n=1}^N |e(n)|^2}{\sum_{n=1}^N |y_{ref}(n)|^2} \right] \quad (3)$$

Onde, $y_{ref}(n)$ é a referência do sinal da envoltória complexa no instante n e $e(n) = y_{ref}(n) - y_{test}(n)$ é o erro de sinal no tempo de instante n definido como a diferença entre os sinais de referência $y_{ref}(n)$ e os de teste

$y_{test}(n)$ no instante n . Para a validação do comportamento dos modelos de PA, o sinal de referência é o sinal medido na saída do PA e o sinal de teste é o sinal de saída estimado no modelo de comportamento do PA quando alimentado pelo mesmo sinal de entrada do PA [3].

Para o cálculo da NMSE nos modelos que utilizam séries de Volterra, foram retiradas as 10 primeiras amostras com o objetivo de diminuir o erro de inicialização.

VI. RESULTADOS

A. Primeira comparação: Produto entre duas séries de Volterra e F1P+

Depois de realizadas as simulações, os valores de NMSE de validação e extração obtidos para cada um dos dois modelos são apresentados na Tabela 1.

TABELA 1. RESULTADOS DE NMSE DO MODELO DO PRODUTO E DO MODELO DE F1P+ ($P = 2$ E $M = 2$)

NMSE (dB) – Produto		NMSE (dB) – F1P+	
Extração	Validação	Extração	Validação
-31,26 dB	-31,22 dB	-31,20 dB	-31,13 dB

Comparando os resultados apresentados na Tabela 1, é possível concluir que ambos os métodos apresentam resultados semelhantes, porém o modelo do produto obteve melhor resultado de NMSE tanto de extração (-31,26 dB) quanto de validação (-31,22 dB), quando comparado com o modelo que utiliza um único filtro e múltiplas funções polinomiais (F1P+). A maior diferença entre os modelos foi na NMSE de validação, que foi de 0,09 dB.

Também foi obtido o gráfico do módulo do erro pelo tempo da otimização não linear do modelo do produto, que pode ser observado na Fig. 3.

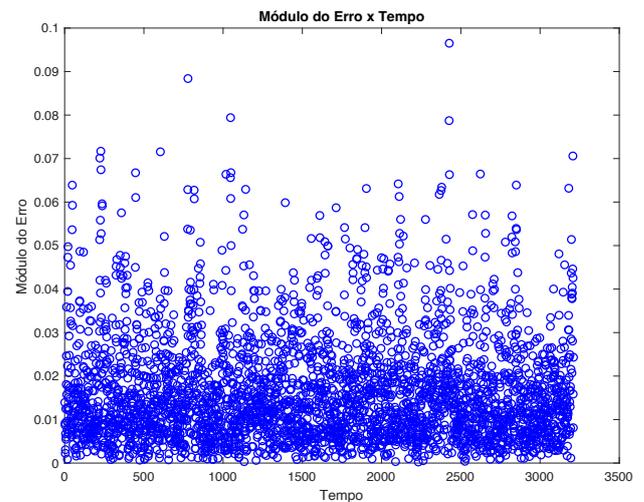


Fig. 3. Gráfico Módulo do Erro pelo Tempo.

A partir do gráfico apresentado na Fig. 3, é possível observar a variação do módulo do erro ao longo das iterações realizadas.

B. Segunda comparação: Produto entre duas séries de Volterra e uma única série de Volterra

Depois de realizadas as simulações para ambos os modelos, os valores de NMSE de validação e extração obtidos são apresentados na Tabela 2.

TABELA 2. RESULTADOS DE NMSE DO MODELO DO PRODUTO E DO MODELO DE UMA ÚNICA SÉRIE ($P = 2$ E $M = 2$)

NMSE (dB) – Produto entre duas séries		NMSE (dB) – Uma única série de Volterra	
Extração	Validação	Extração	Validação
-31,26 dB	-31,22 dB	-32,64 dB	-32,67 dB

A partir da análise comparativa dos resultados apresentados na Tabela 2, é possível concluir que o modelo que utiliza uma única série de Volterra obteve um melhor resultado da métrica NMSE tanto de extração (-32,64 dB) quanto de validação (-32,67 dB), quando comparado com o modelo do produto. A maior diferença ocorreu na validação, onde a diferença entre a NMSE dos modelos foi de 1,45 dB.

Levando em consideração que o modelo de uma única série de Volterra obteve o melhor resultado de NMSE, também foi obtido o seu gráfico de amplitude de saída em função da amplitude de entrada (AM-AM), que pode ser observado na Fig. 4. A análise desse gráfico é importante para verificar visualmente o comportamento do modelo.

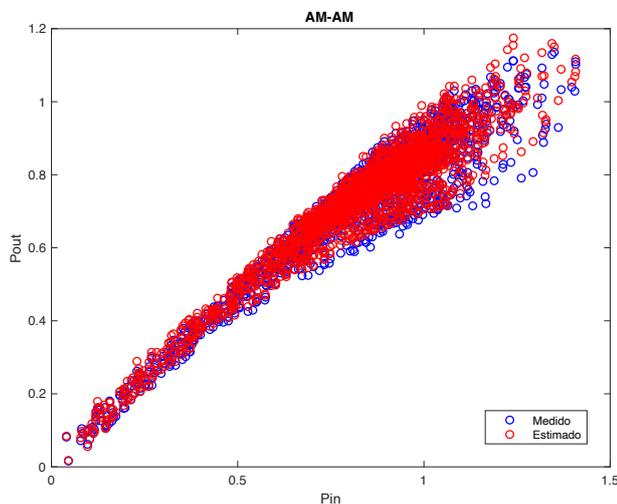


Fig. 4. Gráfico AM-AM para uma única série de Volterra ($P = 2$ e $M = 2$).

Analisando o gráfico AM-AM apresentado na Fig. 4, é possível perceber que os valores estimados pelo modelo que utiliza uma única série de Volterra são condizentes com os valores medidos experimentalmente, validando o modelo.

VII. CONCLUSÃO

Todos os modelos estudados neste trabalho são muito úteis na modelagem comportamental de amplificadores de potência. Cada modelo analisado possui características próprias e apresenta vantagens e desvantagens, principalmente em termos de complexidade e gasto computacional. As comparações realizadas evidenciam que os três métodos apresentam resultados semelhantes, com uma pequena melhora utilizando o método com uma única série de Volterra e extração dos coeficientes através de mínimos quadrados. Sendo assim, apesar do modelo do produto com otimização não linear demandar um algoritmo mais complexo e maior processamento computacional, quando comparado com os outros dois modelos estudados, ele não conseguiu apresentar vantagem expressiva em sua utilização, mesmo levando em consideração que produto entre as duas séries de Volterra reduz o número de coeficientes.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio financeiro do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e pela Fundação Araucária de apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico do Estado do Paraná (FAPPR) no âmbito do Programa PIBIC.

REFERÊNCIAS

- [1] D. Raychaudhuri, N. B. Mandayam, "Frontiers of Wireless and Mobile Communications," Proceedings of the IEEE, vol. 100, pp. 824-840, 2012.
- [2] E. J. Bonfin, "Modelagem Comportamental de Amplificadores de Potência de Rádio Frequência Usando Termos Unidimensionais e Bidimensionais de Series de Volterra," Universidade Federal do Paraná, 2016.
- [3] E. G. Lima, "Behavioral modeling and digital base-band predistortion of RF power amplifiers," Politecnico di Torino, 2009.
- [4] L. S. Da Cunha, A. Carlos, Regressão linear múltipla. Análise multivariada: para os cursos de administração, ciências contábeis e economia. São Paulo: Atlas, 2007.
- [5] L. V. D. Santos, E. G. Lima, "Produto entre duas séries de Volterra com identificação baseada em mínimos quadrados independentes," Seminários de Microeletrônica do Paraná (SeMicro-PR), 2022, Curitiba. Anais do SeMicro-PR, 2022. p. 1-4.
- [6] C. L. R. Machado and E. G. Lima, "A Combined Memory and Envelope-Memory Polynomial Model for RF Power Amplifiers". In: XXIII Iberchip Workshop, 2017, Bariloche. Proceedings of the XXIII Iberchip Workshop, 2017. p. 1-4.
- [7] T. F. Coleman and Y. Li, "An Interior, Trust Region Approach for Nonlinear Minimization Subject to Bounds." SIAM Journal on Optimization, Vol. 6, 1996, pp. 418-445.
- [8] V. J. Mathews, L. G. Sicuranza, Polynomial Signal Processing. New York: Wiley, 2000.
- [9] J. Maroco, Análise Estatística: com utilização do SPSS. 2. ed. Lisboa: Sílabo, 2003.
- [10] M. S. Muha et al. Validation of power amplifier nonlinear block models. In: 1999 IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest (Cat. No. 99CH36282). IEEE, 1999. p. 759-762.