



Modelos Baseados no Produto entre Filtros FIR e Polinômios Unidimensionais e suas Versões Lineares nos Coeficientes

Lara Eimy Kuada, Eduardo Gonçalves de Lima
Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Paraná, Brasil
larakuada@gmail.com
eduardo.lima@ufpr.br

Resumo—Amplificadores de potência (PA) são ferramentas muito utilizadas na transmissão de dados, mas devido a não linearidade no seu funcionamento ocorrem distorções no sinal de saída. A modelagem comportamental tem papel fundamental para a melhoria do seu funcionamento, mas a complexidade do assunto é a principal barreira. Neste trabalho, modelos comportamentais de PA já existentes na literatura, foram simplificados a partir da substituição de produtos entre coeficientes por coeficientes únicos, chegando em uma equação resultante. Logo após, a precisão da equação resultante foi avaliada através dos valores de NMSE (Normalized Mean Square Error), onde as simulações foram realizadas no ambiente MATLAB. A equação resultante obteve um NMSE de -36,89 dB.

I. INTRODUÇÃO

A alta demanda de comunicação sem fio, o processamento e a distribuição de dados se tornaram essenciais com o rápido avanço da tecnologia. Os amplificadores de potência (Power Amplifier - PA) conquistaram grande destaque neste contexto devido à especificidade, aumentando o sinal de entrada e garantindo um maior sinal de saída. Mas, a qualidade de funcionamento pode ser prejudicada devido à sua falta de linearidade de operação e gerando distorções no sinal de saída [1].

Entre as diferentes abordagens para a modelagem comportamental, destacam-se aquelas baseadas em polinômios com memória. Exemplos incluem os modelos que envolvem produtos entre filtros FIR e polinômios unidimensionais, podendo serem usadas diferentes quantidades e configurações de filtros FIR e polinômios unidimensionais. O objetivo desse trabalho é primeiramente transformar esses modelos comportamentais de PA em modelos lineares nos seus coeficientes, a partir da substituição de produtos entre coeficientes por coeficientes únicos. Então será feito um estudo comparativo entre os modelos originais e suas

versões lineares nos coeficientes em termos de precisão de modelagem e quantidade de coeficientes.

A Seção II apresenta os modelos de literatura baseados em filtros FIR e polinômios unidimensionais e a Seção III detalha o desempenho do modelo resultante após a implementação de coeficientes únicos. Em seguida, a Seção IV descreve o método de validação e resultados obtidos a partir da análise das vantagens e desvantagens do modelo resultante, e a Seção V mostra as conclusões finais do trabalho.

II. DESCRIÇÃO DOS MODELOS DE LITERATURA BASEADOS EM PRODUTOS ENTRE FILTROS E POLINÔMIOS

Os modelos polinomiais com memória variam seu funcionamento em decorrência dos valores de profundidade de memória (M) e ordem polinomial (P) adotados. Número de coeficientes, filtros FIR e funções polinomiais estão diretamente relacionados com esses valores. No caso dos coeficientes, suas quantidades podem variar de formas diferentes segundo as equações a seguir:

$$COEF_1 = M + 1, \quad (1)$$

$$COEF_2 = (M + 1) \cdot P, \quad (2)$$

$$COEF_3 = (M + 1)^2. \quad (3)$$

Para todos os modelos $\tilde{x}(n)$ e $\tilde{y}(n)$ correspondem a valores de amostra n de entrada e saída, respectivamente.

A. Modelo I

O modelo da literatura I [2] é composto por um único filtro e várias funções polinomiais, e seu funcionamento pode ser visualizado no diagrama de bloco descrito pela Figura 1.

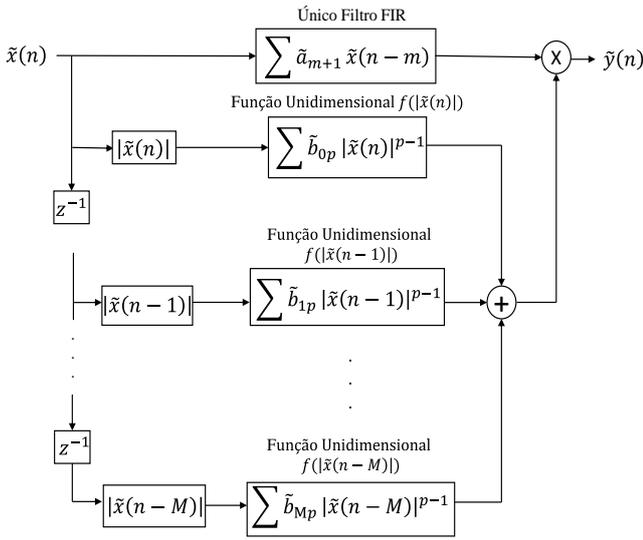


Fig. 1, Diagrama de blocos do modelo I

Neste caso, o número de filtros FIR é constante, sendo unitário, mas o número de funções unidimensionais varia em decorrência do valor de M .

Os números de coeficientes de \tilde{a}_{m+1} e \tilde{b}_{pm} são dados pelas equações 1 e 2, respectivamente.

B. Modelo II

O modelo da literatura II [2] é composto por vários filtros e várias funções polinomiais e seu funcionamento pode ser visualizado no diagrama de bloco descrito pela Figura 2.

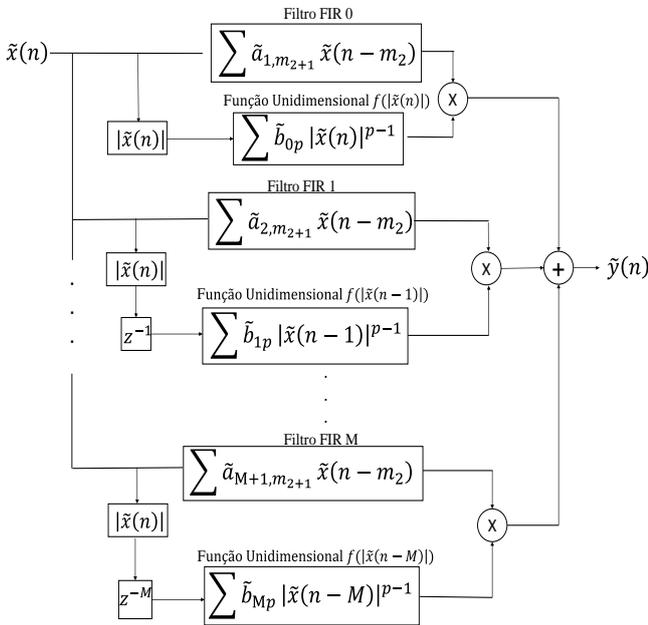


Fig. 2, Diagrama de blocos do modelo II

Neste caso, o número de funções unidimensionais e filtros FIR variam em decorrência do valor de M .

Os números de coeficientes \tilde{a}_{m_1+1, m_2+1} são dados pela equação 3 e \tilde{b}_{m_1p} é idêntico à equação 2.

C. Modelo III

O modelo da literatura III [3] é composto por vários filtros e uma função polinomial e seu funcionamento pode ser visualizado no diagrama de bloco descrito pela Figura 3.

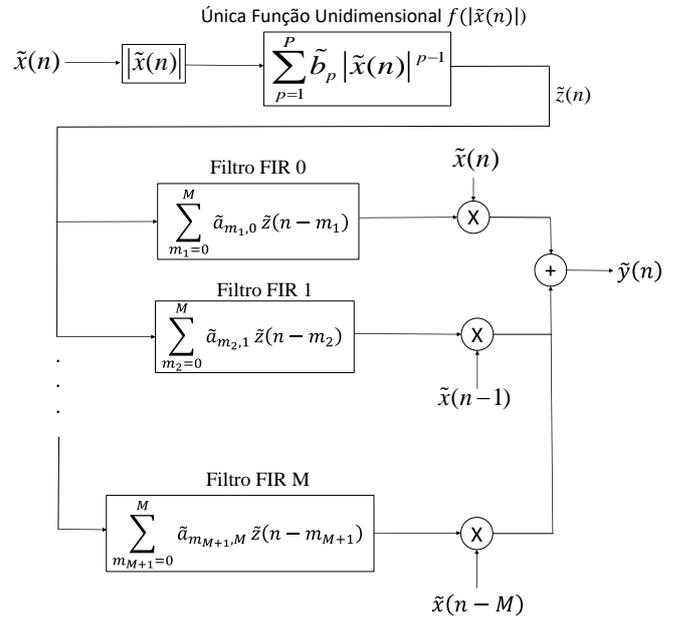


Fig. 3, Diagrama de blocos do modelo III

Neste caso, o número de funções unidimensionais é constante, sendo unitário, mas o número de filtros FIR varia em decorrência do valor de M .

Os números de coeficientes \tilde{a}_{m_1, m_2} são idênticos à equação 3 e \tilde{b}_p é igual a P .

D. Modelo IV

O modelo da literatura IV [4] é composto por vários filtros e várias funções polinomiais e seu funcionamento pode ser visualizado no diagrama de bloco descrito pela Figura 4.

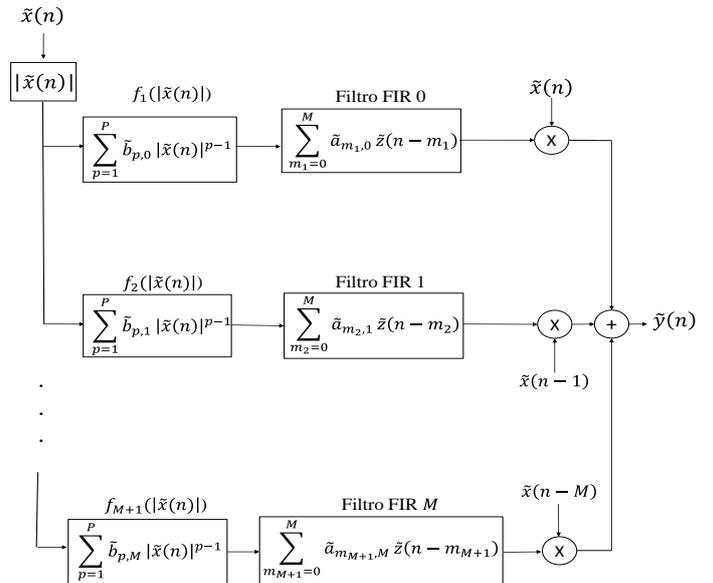


Fig. 4, Diagrama de blocos do modelo IV

Neste caso, o número de funções unidimensionais e filtros FIR variam em decorrência do valor de M . Os números de coeficientes de \tilde{a}_{m_1, m_2} são idênticos à equação 3 e \tilde{b}_{p, m_2} é idêntico à equação 2.

III. MODELO RESULTANTE DA ELIMINAÇÃO DOS PRODUTOS ENTRE COEFICIENTES

Os sinais de saída dos modelos de literatura são sempre fornecidos pelo somatório de termos, em que cada um possui um produto entre dois coeficientes, mas é possível modificá-los por um modelo resultante onde cada termo no somatório tem coeficiente único.

Linearizando a dependência em relação aos coeficientes, foi obtida a seguinte equação resultante:

$$\tilde{y}(n) = \sum_{m_2=0}^M \left[\sum_{m_1=0}^M \sum_{p=1}^P c_{p, m_1+1, m_2+1} |\tilde{x}(n - m_1)|^{p-1} \right] \tilde{x}(n - m_2) \quad (4)$$

A tentativa de tornar linear nos coeficientes os modelos anteriores, resultou em uma equação resultante equivalente à equação 4. É composta por termos unidimensionais e bidimensionais [5] e número de coeficientes de c_{p, m_1+1, m_2+1} é dado pela equação 5:

$$COEF_4 = (M + 1)^2 \cdot P. \quad (5)$$

A equação resultante apresenta vantagens por ser lineares nos coeficientes, ou seja, a identificação é mais simples. Por outro lado, a desvantagem está no elevado número de coeficientes dependendo da escolha dos valores de M e P .

IV. MÉTODO DE VALIDAÇÃO E RESULTADOS

A etapa de validação foi baseada em conjuntos de dados de um amplificador de potência, em especial, um PA contendo um transistor do tipo GaN, excitado por duas portadoras moduladas por sinais Wide Band Code Division Multiple Access (WCDMA) de larguras de bandas semelhantes a 3,84 MHz, distanciadas entre si por 5 MHz e com sinal resultante centrado em 900 MHz. A frequência de amostragem foi de 61,44 MHz para os sinais de entrada e saída.

Os dois principais conjuntos de dados eram dados de extração e validação. Dados de extração foram utilizados para obter os valores dos coeficientes e os dados de validação, para calcular os sinais de saída e avaliar a precisão das equações.

Os valores de profundidade de memória (M) e ordem polinomial (P) podem ser escolhidos arbitrariamente, mas para valores de $P = 3$ e $M = 2$ os modelos de literatura obtiveram bons resultados [4]. Dessa forma, os mesmos valores foram utilizados para a equação resultante.

As simulações necessárias foram realizadas no ambiente *Matlab*, usando aritmética de vírgula flutuante de

precisão dupla com auxílio de otimização não linear a partir de *lsqnonlin* e método dos mínimos quadrados com o comando “\”.

Para verificar a precisão da equação 4, o valor de NMSE (Normalized Mean Square Error) foi calculado utilizando os dados de validação, a partir da equação a seguir:

$$NMSE = 10 \log_{10} \frac{\sum_{n=1}^N |y_{real}(n) - y_{sim}(n)|^2}{\sum_{n=1}^N |y_{real}(n)|^2}, \quad (6)$$

assumindo $y_{real}(n)$ como o valor de saída e $y_{sim}(n)$ como o valor de saída simulado pelo modelo no instante n e N é a quantidade total de amostras.

A Tabela 1 apresenta os valores de NMSE dos modelos de literatura [4] junto ao valor obtido da equação resultante.

TABELA 1. VALORES DE NMSE DOS DIFERENTES MODELOS

	Valor NMSE (dB)	Número de coeficientes
Modelo I	-36,84	12
Modelo II	-36,85	18
Modelo III	-34,42	12
Modelo IV	-36,86	18
Eq. Resultante	-36,89	27

Analisando a tabela, a equação resultante obteve um desempenho semelhante aos modelos da literatura, mas apresentou o melhor valor de NMSE de -36,89 dB.

Além de valores numéricos, a precisão e comportamento da equação resultante pode ser avaliado a partir de gráficos comportamentais como amplitude do sinal de saída, de acordo com a Figura 5 e gráfico da curva característica Modulação em Amplitude - Modulação em Amplitude (*AM-AM*), de acordo com a Figura 6.

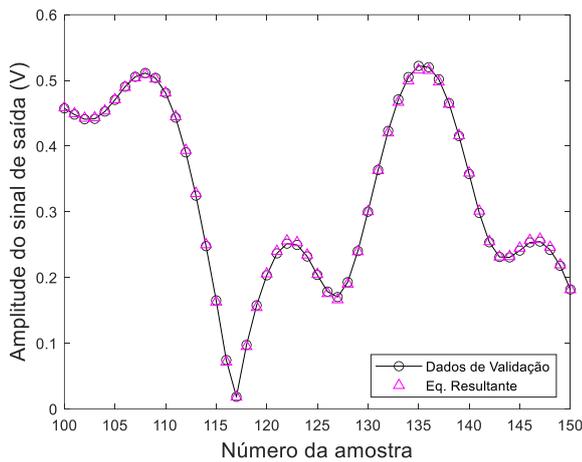


Fig. 5. Comportamento da amplitude do sinal de saída da equação resultante

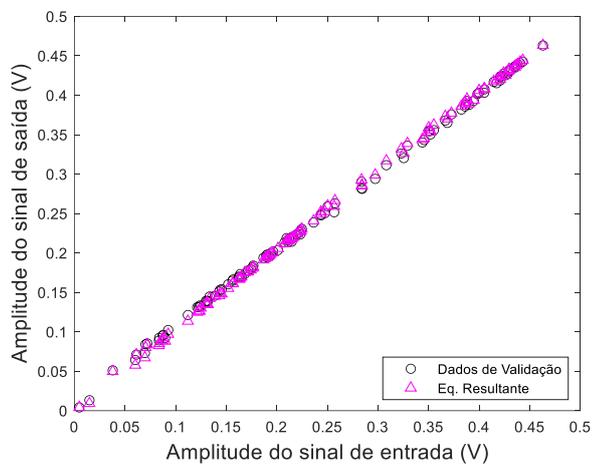


Fig. 6. Curva característica AM-AM

V. CONCLUSÃO

Modelagens comportamentais são essenciais para melhorar o desempenho dos amplificadores de potência, porém a complexidade dessa ferramenta é um dos problemas para sua utilização e implementação. Pensando nisso, o objetivo do trabalho foi substituir o produto de dois coeficientes de quatro modelos comportamentais de PA, por um coeficiente único e obtendo uma equação resultante.

A implementação da equação resultante traz benefício por tornar o modelo linear nos coeficientes, ou seja, facilitando o entendimento e identificação, levando em consideração que as equações originais são complexas. Mas por outro lado o número de coeficientes pode aumentar, dependendo da escolha de M e P .

Para validar a precisão da equação resultante simulações no ambiente *Matlab* foram realizadas com valores de $M = 2$ e $P = 3$ e o cálculo do NMSE, em que comparando o valor da equação resultante com os modelos de literatura [4], a equação resultante obteve o melhor NMSE, dentre todos, de $-36,89$ dB.

Além de comparação de valores numéricos, foi analisado o desempenho da equação resultante em gráficos comportamentais em relação ao sinal de saída dos dados de validação, o qual ambos são muito similares.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio financeiro do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq). Esta pesquisa foi desenvolvida no âmbito do programa PIBITI UFPR 2021

REFERÊNCIAS

- [1] CRIPPS, S. C. RF Power Amplifiers for Wireless Communications, ArtechHouse, 2006.
- [2] MACHADO, C. L. R. ; LIMA, E. G. 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.
- [3] KUADA, L. E. ; LIMA, E. G. "Modelagem Comportamental Baseada em uma Única Função Polinomial Unidimensional e Vários Filtros de Resposta ao Impulso Finita". SeMicro-PR, 2020
- [4] KUADA, L. E. ; LIMA, L. E. "Behavioral Models of Power Amplifier Using Multiple One-Dimensional Polynomial Functions and Multiple Finite Impulse Response Filters". SForum, 2022
- [5] BONFIM, E. J. ; LIMA, E. G. . A MODIFIED TWO DIMENSIONAL VOLTERRA-BASED SERIES FOR THE LOW-PASS EQUIVALENT BEHAVIORAL MODELING OF RF POWER AMPLIFIERS. Progress In Electromagnetics Research M, v. 47, p. 27-35, 2016