



Modelagem de amplificadores multimodos usando regressão linear e polinômio de memória

Eloiza Arandia Bruschi¹, Eduardo Gonçalves de Lima¹

Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Brasil

eloiza.bruschi@ufpr.br

Resumo — Os amplificadores de potência (PAs) multimodos desempenham um papel essencial na manutenção da estabilidade e eficiência dos sinais em ambientes de alta demanda, típicos das modernas aplicações de comunicação sem fio. Este estudo teve como objetivo principal desenvolver um modelo matemático robusto, capaz de prever com precisão as respostas dos PAs, cuja modelagem apresenta desafios significativos devido à sua natureza dinâmica e descontínua. Neste contexto, investigou-se a aplicação de modelos polinomiais com memória, que consideram tanto as entradas atuais quanto as passadas em um horizonte temporal definido, para prever a amplitude de saída de um PA multimodo em função da amplitude de entrada. A expectativa inicial era que o modelo polinomial com memória proporcionasse uma representação significativamente mais precisa do comportamento do PA, destacando a relevância de métodos matemáticos sofisticados para enfrentar os desafios específicos da modelagem de sistemas complexos. Os resultados obtidos indicaram que os modelos polinomiais com memória apresentaram desempenho superior aos lineares, especialmente na captura das características não lineares e descontínuas do sistema. Assim este trabalho reforça a importância de combinar métodos analíticos e computacionais na modelagem de amplificadores de PAs.

I. INTRODUÇÃO

A crescente demanda por sistemas de comunicação sem fio que ofereçam maior eficiência e qualidade de sinal tem impulsionado intensas pesquisas na área de amplificadores de potência. Esses dispositivos são cruciais para a transmissão de dados, pois amplificam os sinais emitidos, assegurando que as informações cheguem com integridade e eficácia, mesmo em ambientes adversos repletos de interferências e ruídos. A intensidade dessa necessidade aumenta à medida que as tecnologias avançam, abrangendo aplicações que vão desde redes móveis até comunicações via satélite.

Modelos precisos de amplificadores de potência são fundamentais para o desenvolvimento de sistemas de comunicação mais eficientes, caracterizados por menor consumo de energia e melhor qualidade de sinal.

Por meio de simulações no software MATLAB o qual foi escolhido como ferramenta principal devido às suas capacidades de cálculo matemático, visualização de dados e análise estatística. Tradicionalmente, para a modelagem de sistemas dinâmicos, como os amplificadores de potência, tem recorrido a técnicas como à regressão linear, uma técnica simples e amplamente utilizada em estatística e aprendizado de máquina [1]. A regressão linear facilita a análise de dados ao aproximar o comportamento de um conjunto de dados por meio de uma linha reta. Essa abordagem é especialmente útil para modelar a relação entre entrada e saída, como na interação entre a potência de entrada e a potência de saída dos amplificadores sob condições específicas.

No entanto, a regressão linear apresenta limitações significativas ao lidar com a complexidade intrínseca dos amplificadores de potência multimodos. Essa técnica é incapaz de capturar interações complexas que caracterizam comportamentos não lineares e sua sensibilidade a *outliers* pode levar a ajustes enviesados, comprometendo a precisão das previsões.

Reconhecendo essas limitações, o presente estudo propõe a utilização de um modelo polinomial de memória, que se destaca pela sua capacidade de considerar não apenas as entradas atuais, mas também as passadas, ao modelar a dinâmica do sistema. Essa abordagem é particularmente relevante em sistemas onde a saída em um determinado instante depende de uma série de entradas anteriores.

Ao contrário de um PA convencional, que opera em um único modo com um nível de ganho fixo, o PA multimodo possui a capacidade de alternar entre diferentes modos de operação, cada um com um ganho distinto. Essas transições entre modos são frequentemente não lineares e podem ocorrer abruptamente, o que adiciona dificuldade à modelagem e ao controle do PA multimodo. Essas descontinuidades e comportamentos não lineares tornam a modelagem uma tarefa complexa e demandam soluções mais sofisticadas.

Nesse contexto, este estudo busca contribuir para o desenvolvimento de soluções que aprimorem a modelagem

desses dispositivos, permitindo uma melhor representação de suas características dinâmicas e não lineares. Ao abordar essas complexidades, espera-se viabilizar sistemas de comunicação mais eficientes, com menor consumo de energia e maior robustez em cenários desafiadores.

Por fim, o artigo está organizado para proporcionar uma visão abrangente e estruturada do estudo. Primeiramente, são apresentados os conceitos teóricos e os métodos utilizados, com ênfase nos modelos polinomiais com memória. Em seguida, a implementação prática e os experimentos realizados são descritos em detalhes. Na parte dedicada aos resultados e análises, são discutidos os achados da pesquisa, incluindo uma comparação com métodos lineares e redes neurais. Por último, o trabalho é concluído com um resumo das principais descobertas e uma discussão sobre possíveis direções para futuras investigações.

II. REGRESSÃO LINEAR E POLINÔMIO DE MEMÓRIA

A modelagem precisa de PAs multimodos apresenta desafios significativos devido à sua natureza intrinsecamente não linear e à presença de transições abruptas entre diferentes modos de operação, o que impacta diretamente na qualidade do sinal transmitido. Para contornar essas complexidades, diversas abordagens são empregadas neste trabalho, sendo brevemente revisadas a seguir.

A regressão linear, em sua simplicidade, busca aproximar o comportamento de um conjunto de dados por meio de uma linha reta. Na regressão linear tem-se:

$$Y = aX + b \quad (1),$$

onde ‘Y’ representa a variável que queremos prever, ‘X’ é a variável independente que usamos para fazer a previsão, o ‘a’ representa o coeficiente angular (inclinação da reta) também sendo a mudança em Y para uma mudança unitária em X e ‘b’ o coeficiente linear, o valor do Y quando X é igual a 0.

Apesar de sua facilidade de implementação e interpretação intuitiva dos coeficientes, esta técnica mostra-se inadequada para modelar sistemas com comportamentos não lineares, pois pressupõe uma relação linear entre variáveis, o que não se verifica em PAs multimodos.

Modelos polinomiais com memória, uma extensão da regressão linear, oferecem uma abordagem mais abrangente para capturar dependências temporais e não linearidades. Ao considerar não apenas a entrada atual, mas também entradas passadas em um determinado intervalo (memória), esses modelos permitem representar com maior precisão a dinâmica do sistema. A ordem do polinômio e o comprimento da memória são parâmetros cruciais que influenciam diretamente na capacidade do modelo de se ajustar aos dados e na complexidade das relações capturadas. Quanto maior a ordem do polinômio e maior a

memória, maior a capacidade de modelar complexidades, porém tem-se também o aumento da dimensionalidade. A seguinte equação descreve um modelo polinomial para sistemas dinâmicos:

$$\sum_{p=1}^P \sum_{m=0}^M h p(m) [in(n-m)]^p = X^T(n)H, \quad (2)$$

Para prever a saída $y(n)$ no tempo n como uma combinação de potências de entradas passadas e presentes. A soma dupla indica que a saída é modelada por uma combinação de termos polinomiais (de ordem 1 a P) que incorporam a influência de entradas em instantes de tempo anteriores (até um atraso M). A notação matricial $X^T(n)H$ resume essa combinação, sendo $X^T(n)$ o vetor das entradas e H o vetor de coeficientes a serem determinados. Em essência, este modelo captura a não linearidade e as dependências temporais do sistema.

O desempenho do modelo é avaliado utilizando o Erro Quadrático Médio (MSE), que mede a discrepância entre os valores previstos e os observados. A formula do MSE é:

$$\sum_{i=1}^k \frac{(Y_i - \hat{Y}_i)^2}{k} \quad (3)$$

Onde k representa o número total de observações. Y_i é o valor real observado para a i -ésima amostra, enquanto $\hat{Y}_i$ é o valor previsto pelo modelo para essa mesma amostra. O termo $(Y_i - \hat{Y}_i)^2$ calcula o erro ao quadrado para cada amostra, penalizando mais os erros maiores e garantindo que todos os erros sejam positivos. O somatório acumula todos esses erros quadráticos, e a divisão por k faz a média desses erros.

III. ESTUDO DE CASO

Os dados utilizados nas atividades foram extraídos de um Dispositivo sob Teste (DUT), que consiste em um PA classe AB, implementado com Transistor de Alta Mobilidade de Elétrons (HEMT) em tecnologia de Nitreto de Gálio (GaN). O DUT foi excitado por um sinal portador de 900 MHz, modulando-se com um sinal de envoltória WCDMA 3GPP, que apresentou uma largura de banda aproximada de 3,84 MHz. As medições dos dados de entrada e saída foram realizadas com um Analisador de Sinal Vetorial (VSA) da Rohde & Schwarz, modelo FSQ, a uma frequência de amostragem de 61,44 MHz [2].

Como primeira etapa na modelagem do PA multimodo, adotou-se a técnica de regressão linear, amplamente utilizada por sua simplicidade para estabelecer uma relação linear entre variáveis. Utilizando a função de mínimos quadrados do MATLAB, aplicou-se essa metodologia aos dados experimentais de amplitude, empregando a função $\text{abs}(\text{out})$ como variável dependente e $\text{abs}(\text{in})$ como variável independente, resultando na equação da reta.

Conforme mostra a Figura 1, pode-se utilizar a regressão linear para modelar a relação entre a potência de

entrada e a potência de saída, obtendo uma linha reta que representa um PA operando em um regime linear. No entanto, se o amplificador opera em um regime não linear, como acontece quando a potência de entrada atinge um determinado limiar, na transição de modo de operação, a regressão linear não será mais adequada para modelar a relação entre a entrada e a saída.

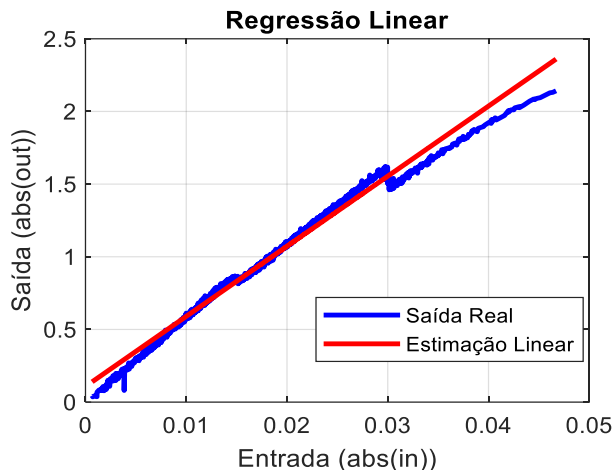


Fig. 1 Gráfico da comparação da saída do amplificador com um modelo de regressão linear

As limitações da regressão linear e o nível de erro apresentado de MSE calculado igual a 0,0022059 que pode ser considerado alto, como é apreciado na fig.1 pela dificuldade em modelar a dinâmica não linear e a dependência temporal do PA multimodo motivando assim a adoção de um modelo polinomial com memória. Este modelo incorpora informações históricas, considerando as amplitudes de entrada e saída (valores absolutos) das primeiras 500 amostras, para melhor visualização. As Figuras 2 e 3 abaixo ilustram o comportamento dos dados experimentais (em azul) comparado ao modelo estimado (em vermelho) para diferentes valores dos parâmetros $P=1$ e $M=1$. Na Fig. 2, com valores de $P=7$ e $M=7$, observa-se uma proximidade limitada entre os resultados do modelo e os dados experimentais, enquanto na Fig. 3, com valores mais altos, a semelhança entre os dois aumenta, indicando a capacidade do modelo em capturar as dinâmicas do sistema, as variações da amplitude de saída em função do tempo.

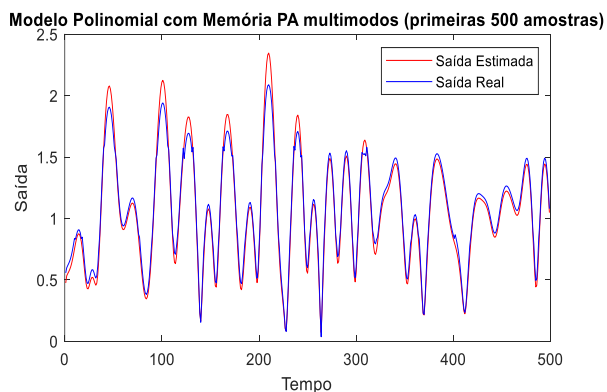


Fig.2 Gráfico da comparação da saída real e estimada para valores de $P=1$ e $M=1$

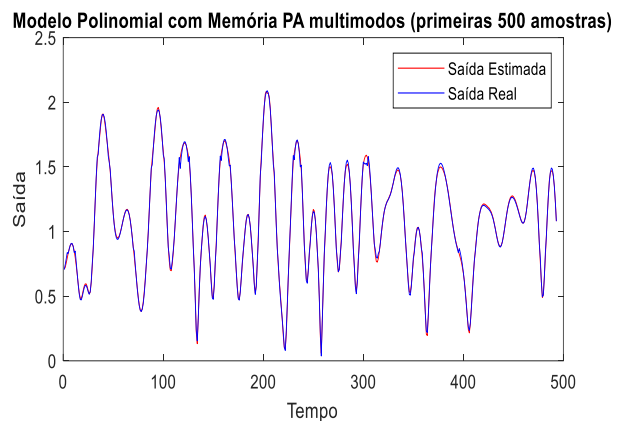


Fig.3 Gráfico da comparação da saída real e estimada para valores de $P=7$ e $M=7$

IV. DISCUSSÃO

Os dados iniciais, provenientes das medições do amplificador de potência multimodo, apresentavam a complexidade característica desse tipo de dispositivo, foram simplificados pela modelagem da amplitude de saída em relação à amplitude de entrada, utilizando a função MATLAB 'abs(out)' em comparação com 'abs(in)'. Essa abordagem permitiu trabalhar exclusivamente com sinais reais, tornando a análise preliminar mais eficiente. Na Fig. 4, ilustra o comportamento dos dados experimentais (em azul) comparado ao modelo estimado (em vermelho) ao longo do tempo. As duas curvas, uma representando a "Saída Real" e a outra a "Saída Estimada", são apresentadas para uma série de medições realizadas. Na análise, observa-se que as duas curvas seguem padrões semelhantes, com a saída estimada se aproximando da real, o que indica que o modelo utilizado é eficaz em capturar as principais características do comportamento dos dados.

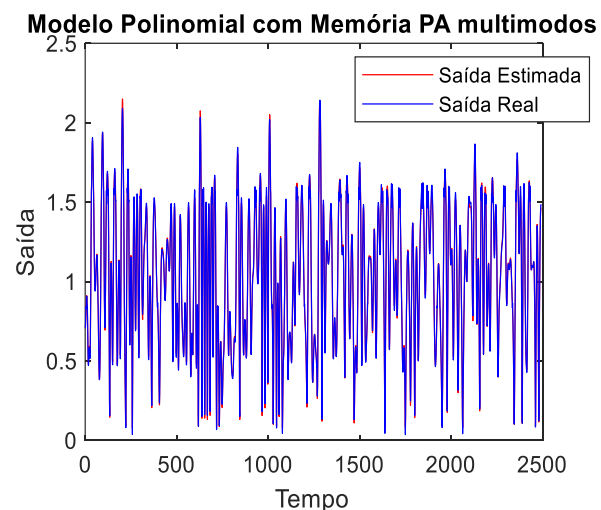


Fig.4 Gráfico do modelo do polinômio de memória de um PA

Na etapa seguinte, aplicando um modelo polinomial de memória previamente desenvolvido para representar a saída do amplificador ao longo do tempo. A análise visual indica que esse modelo captura adequadamente as

tendências gerais do comportamento do amplificador, embora apresente algumas discrepâncias em áreas de transição rápida do sinal. A boa concordância entre a saída estimada e a saída real, além do baixo nível de erro calculado MSE igual a 0,00047655 em comparação ao achado na aproximação linear, sugere que o modelo é capaz de aproximar satisfatoriamente o comportamento do amplificador sob certas condições. No entanto, as discrepâncias observadas nas regiões de mudança abrupta do sinal evidenciam as limitações do modelo polinomial em representar a complexidade dinâmica do amplificador, especialmente durante as transições.

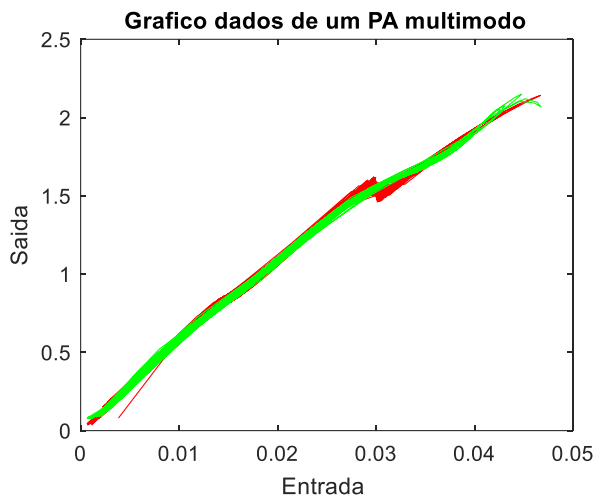


Fig. 5 Aplicação do polinômio com memória em comparação com um modelo PA

A análise da Figura 5, que mostra a relação entre os dados de saída e entrada do módulo da potência do amplificador utilizando o modelo polinomial, destaca a dificuldade desse modelo em capturar as descontinuidades, particularmente durante as transições entre modos de ganho. Essa limitação sugere que, apesar de sua aplicabilidade em determinados contextos, o modelo polinomial de memória talvez não seja o ideal para capturar todas as nuances complexas do funcionamento dos amplificadores.

V. CONCLUSÃO

Este estudo se dedicou à modelagem do comportamento de PAs multimodos, sendo o objetivo principal o de desenvolver um modelo matemático capaz de prever com precisão as respostas dos PAs. Inicialmente, explorando a regressão linear como uma técnica de modelagem simples, mas as suas limitações em lidar com sistemas não lineares e descontinuidades tornaram-se evidentes. Embora eficaz para muitos cenários, a regressão linear mostrou-se inadequada para representar o comportamento complexo dos PAs multimodos.

Para abordar essas limitações, referências de pesquisa têm sido exploradas, como a utilização de polinômios

descontínuos, que são projetados para capturar melhor as mudanças bruscas entre os modos de operação [3]. Esses polinômios podem lidar mais eficazmente com as descontinuidades introduzidas pela comutação de ganho, melhorando a linearização do amplificador em cenários multimodos.

Avançando, então, para a utilização de modelos polinomiais com memória, que consideram dependências temporais entre entradas e saídas. Conseguindo diminuir o nível de erro apresentado inicialmente pelo modelo linear, que obteve um MSE de 0,0022059, para um valor significativamente menor com o modelo polinomial de memória, que alcançou um MSE de 0,00047655, resultando em uma melhoria de aproximadamente 78,4%. Essa abordagem apresentou maior precisão em comparação à regressão linear, mas ainda enfrentou desafios significativos nas transições abruptas entre modos de operação. Para superar essas limitações, a implementação de redes neurais do tipo perceptron de três camadas representaria uma evolução promissora da pesquisa. Inspiradas no funcionamento do cérebro humano [4], as redes neurais demonstram uma capacidade de aprendizado e adaptação que pode ser vantajosa para lidar com a complexidade inerente aos amplificadores de potência multimodos, podendo ser abordada em trabalhos futuros.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio financeiro do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) no âmbito do Projeto CNPq nº 406193/2022- 3 INCT-NAMITEC Nano e Microeletrônica para tecnologias habilitadoras e Programa PIBIC CNPq UFPR 2024 e também da Fundação Araucária de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico do Estado do Paraná (FA) no âmbito do Programa PIBIC FA UFPR 2023.

REFERÊNCIAS

- [1] HAYKIN, S. *Neural Networks and Learning Machines*. Pearson, 2009.
- [2] Elton John Bonfim, and Eduardo Goncalves de Lima, "A Modified Two Dimensional Volterra-Based Series for the Low-Pass Equivalent Behavioral Modeling of RF Power Amplifiers," *Progress In Electromagnetics Research M*, Vol. 47, 27-35, 2016.
- [3] Luis Schuartz, Edson L. Santos, Bernardo Leite, André A. Mariano, Eduardo G. Lima. *Reduced-Complexity Polynomials with Memory Applied to the Linearization of Power Amplifiers with Real-Time Discrete Gain Control*. 25 January 2019
- [4] Haykin, *Neural Networks: A Comprehensive Foundation*, Prentice Hall, New Jersey, 1999