

Acurácia de Polinômios de Memória com Processamento em Vírgula Fixa

Leonardo de Andrade Santos, Sibilla Batista da Luz França,
Eduardo Gonçalves de Lima
UFPR, Curitiba, Brasil
leonard.andrade@ufpr.br

Resumo— A evolução dos sistemas de comunicação móveis tem gerado a necessidade de sistemas mais eficientes e robustos. Nesse contexto, a utilização de um dispositivo de pré-distorção digital (DPD) em conjunto com um amplificador de potência (PA) surge como uma alternativa promissora para aprimorar a eficiência energética desses sistemas. Essa técnica tem se destacado por sua capacidade de aumentar a linearidade e eficiência dos PAs. O objetivo deste trabalho é o estudo da modelagem matemática de um PA usando polinômio de memória (MP). Durante o desenvolvimento do modelo apresentado, foram realizados testes para avaliar o desempenho do modelo com MP de grau 2. A métrica de Erro Quadrático Médio Normalizado (NMSE - Normalized Mean Squared Error) foi utilizada para quantificar a qualidade da modelagem implementada. Neste trabalho, foi obtido um NMSE de -23,74 dB para o modelo implementado, que foi adaptado de forma a otimizar o hardware afetando minimamente os resultados obtidos e para isso foram necessários 33 bits, sendo estes 15 bits de resolução, 17 bits de overflow e 1 bit de sinal.

I. INTRODUÇÃO

A evolução dos sistemas de comunicação móveis, impulsionada pela crescente demanda por comunicações mais rápidas e eficientes, tem levado à implementação de uma variedade de serviços, incluindo aplicações multimídia, desenvolvimento web e aplicações IoT [1]. No entanto, essa evolução também trouxe desafios significativos, como a necessidade de melhorar a eficiência energética, tanto para dispositivos móveis, visando aumentar a autonomia da bateria, quanto para estações de rádio base, visando reduzir o consumo de energia devido às perdas de calor.

Para atender a essas demandas, estratégias de modulação que alteram tanto a fase quanto a amplitude de ondas portadoras em radiofrequência (RF) se tornaram essenciais [2]. Além disso, a modulação na amplitude (AM) requer linearidade na transmissão para evitar erros e interferências na comunicação entre usuários vizinhos [3]. Essa complexa tarefa recai sobre o projetista do amplificador de potência de radiofrequência (PARF), que enfrenta o desafio de desenvolver um hardware eficiente em termos energéticos e linear ao mesmo tempo, uma vez que esses dois objetivos podem entrar em conflito [4].

Uma solução para contornar esse desafio é a implementação de um DPD, que visa compensar a distorção causada pelo PARF [3]. O DPD é conectado em cascata ao PARF e requer um modelo de alta precisão e baixa complexidade computacional para representar as características de transferência direta e inversa do PARF. Existem duas abordagens para modelar o PARF: modelos físicos, que são detalhados e computacionalmente complexos, e modelos empíricos, que se baseiam em medições de entrada e saída do PARF, com menor complexidade computacional, mas com uma possível diminuição da precisão.

O objetivo deste trabalho é avaliar a acurácia da modelagem comportamental de RFPA baseado em polinômio de memória (MP) com processamento em vírgula fixa.

II. POLINÔMIO DE MEMÓRIA

O polinômio de memória é um modelo matemático que é utilizado em diversas áreas da ciência e da computação. Baseia-se na ideia de que o estado atual do processo é uma função não-linear do estado anterior. O MP pode ser representado como um modelo linear nos coeficientes que pode ser identificado por regressão linear, em outras palavras, ele pode prever o comportamento futuro de uma dada série temporal de um processo, estimando os coeficientes do modelo utilizando as técnicas de regressão linear. Essa característica concede ao MP a capacidade de capturar a não linearidade de processos dinâmicos. No entanto, é importante ressaltar que a escolha do grau do polinômio e do número de variáveis exógenas deve ser cuidadosamente avaliada para evitar o problema de sobreajuste (*overfitting*) aos dados de treinamento.

A matriz de regressão XX consiste em uma matriz de regressão polinomial onde cada coluna da matriz deve conter uma determinada função da entrada que então será multiplicada por um coeficiente específico. Assim, a coluna 1 contém a entrada atual, a coluna 2 a entrada passada para os N sinais de memória, a coluna $N+1$ o quadrado da entrada atual e assim por diante para os P graus pares do polinômio escolhido. Portanto o modelo MP pode ser descrito pela equação 1 [5]:

$$\tilde{y}(n) = \sum_{p=1}^P \sum_{m=0}^M b_{2p-1,m} \widetilde{|x(n-m)|^{2p-2}} \widetilde{x(n-m)} \quad (1)$$

É válido ressaltar que os dados analisados são números complexos, que são uma extensão dos números reais que inclui uma componente imaginária. Eles são representados na forma $a + bi$, onde a é a parte real e b é a parte imaginária (sendo i a unidade imaginária, igual a $\sqrt{-1}$). Os números complexos permitem a representação de quantidades que não podem ser expressas apenas com números reais e são essenciais em muitos campos da matemática, física e engenharia. Podem ser usados para descrever números complexos, pontos no plano complexo e até mesmo modelar fenômenos oscilatórios, como ondas eletromagnéticas.

III. DESENVOLVIMENTO

O modelo de polinômio desenvolvido foi um de segundo grau, com uma amostra de memória.

Portanto, foi feito um código da identificação do modelo MP em python, em vírgula flutuante, que alcançou um NMSE de -23,74 dB. Em seguida, é feito o levantamento da quantidade de bits necessários para fazer os cálculos do polinômio de memória sem afetar drasticamente os resultados, de forma a otimizar os recursos de hardware. Para isso foi adaptado o algoritmo de forma que os cálculos fossem realizados com valores de vírgula fixa. Para tal é necessário inicialmente separar a parte real e imaginária dos dados, e em seguida realizar a normalização, isto é, dividir todos os valores pelo elemento de maior módulo, de forma que a saída seja um valor entre 0 e 1. Finalmente, é realizada a multiplicação desse valor por 2^M , onde M é a quantidade de bits utilizado para a resolução do sinal.

A figura 1 ilustra o modelo implementado. Nesta figura, U corresponde ao sinal de entrada, composto por UR (parte real) e UI (parte imaginária), n é o número da amostra, e os valores de C_x compõem os coeficientes do polinômio de memória, que também são números complexos. Sendo assim, os produtos ilustrados na figura 1 entre os coeficientes e as entradas são multiplicações que ocorrem separadamente na parte real e imaginária, seguindo a seguinte lógica: $C = a + b * i$. Logo, a saída de uma multiplicação é ilustrada pela seguinte equação:

$$U * C = a * UR - (b * UI) + a * UI + UR * b \quad (2)$$

Portanto a saída do modelo pode ser descrita pela seguinte equação:

$$\begin{aligned} XR + XI(n) = & (UR(n) + UI(n)) (C_0 \\ & + C_1 ((UR(n) + UI(n))^2)) \\ & + ((UR(n-1) \\ & + UI(n-1))(C_2 \\ & + C_3((UR(n-1) \\ & + UI(n-1))^2) \end{aligned} \quad (3)$$

Onde n é a amostra atual e $n-1$ é a amostra passada.

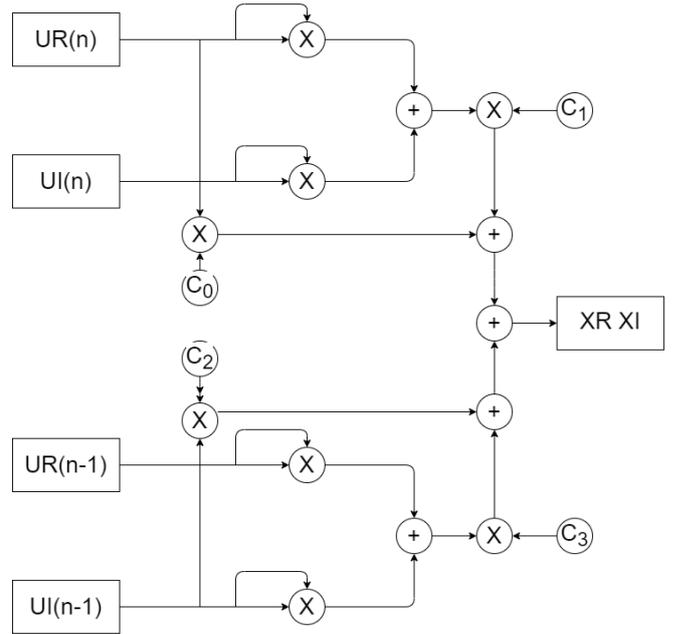


FIGURA 1 - ILUSTRAÇÃO DO MODELO

IV. RESULTADOS

Entre os resultados alcançados temos o resultado do modelo do polinômio de memória de segundo grau com uma amostra de memória, ou seja, espera-se um sinal de saída idêntico ao sinal de entrada. Para isso os sinais de entrada e de saída foram medidos de um amplificador de potência classe AB, que utiliza um HEMT (transistor de efeito de campo de heterojunção) fabricado em tecnologia GaN. O amplificador foi excitado por um sinal portadora de frequência de 900 MHz e modulado por um sinal de envoltória WCDMA 3GPP com cerca de 3,84 MHz de largura de banda. Os dados de entrada e saída do amplificador de potência foram medidos usando um analisador de sinal vetorial (VSA) Rohde & Schwarz FSQ com uma taxa de amostragem de 61,44 MHz, disponível em [6]. Em seguida, o MP foi identificado em vírgula flutuante com $P = 2$ e $M = 1$, resultando em um NMSE de -23,74 dB. As figuras 2 e 3 mostram os gráficos da amplitude de saída em função da amplitude de entrada (AM-AM) e a diferença entre fase de saída e de entrada em função da amplitude de entrada (AM-PM), para dados medidos e estimados. Espera-se que os pontos plotados na saída estimada (cor laranja) e medida (cor azul) sejam os mais próximos possíveis, destacando que o modelo é fiel, de forma a garantir a confiabilidade do modelo calculado.

TABELA 1. RELAÇÃO ENTRE BITS E NMSE

Bits de resolução	Bits de overflow	Total de bits	NMSE (dB)
2	4	7	-3,31
4	6	11	-5,69
6	8	15	-14,71
8	10	19	-22,18
10	12	23	-23,66
15	17	33	-23,74

As figuras 4 e 5 a seguir ilustram o comportamento desse modelo. Elas mostram os gráficos da amplitude de saída em função da amplitude de entrada (AM-AM) e a diferença entre fase de saída e de entrada em função da amplitude de entrada (AM-PM), para dados medidos e estimados. Conforme os gráficos ilustrados pelas figuras 2 e 3 espera-se que os pontos plotados na saída estimada (cor laranja) e medida (cor azul) sejam os mais próximos possíveis.

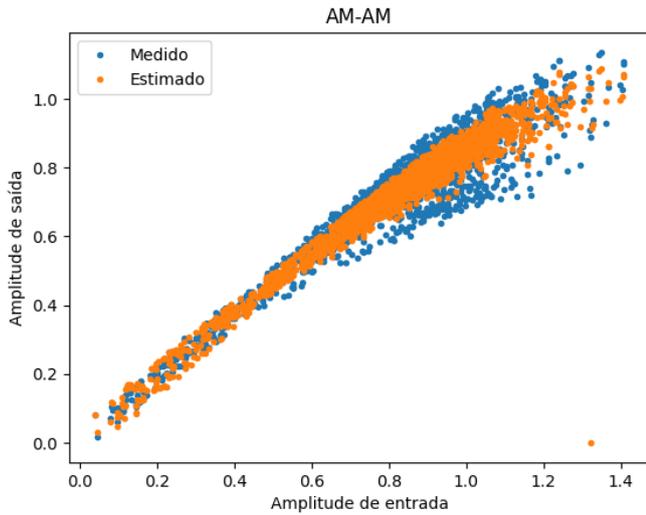


FIGURA 2 - GRÁFICOS PM-PM DO MODELO

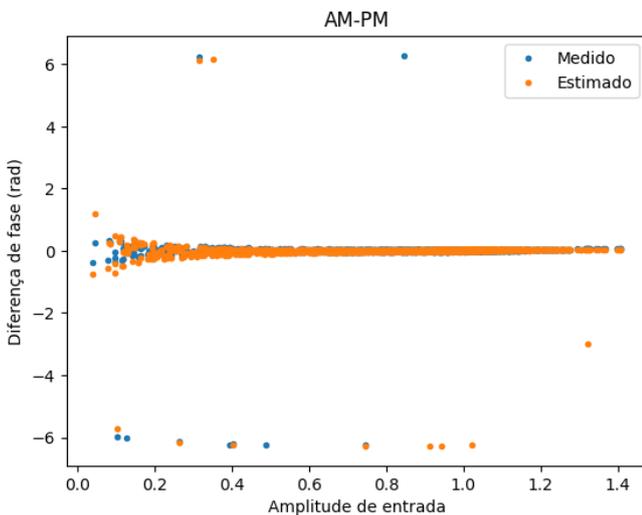


FIGURA 3 - GRÁFICOS AM-PM DO MODELO

Como mencionado anteriormente, foi feita a adaptação do projeto para executar operações com valores em vírgula fixa. Para alcançar esse objetivo, iniciou-se com a normalização das amostras, ajustando-as para um intervalo entre 0 e 1. Em seguida, procedeu-se à conversão desses valores para o formato de vírgula fixa especificado anteriormente. Além disso, a função responsável pelo cálculo da matriz do polinômio de memória foi adaptada para operar com números em vírgula fixa, realizando operações separadas para números complexos, com uma readequação apropriada que descarta os bits de menor significância a cada multiplicação entre números inteiros. Para isso espera-se que quanto maior a quantidade de bits de resolução, mais próximo os resultados terão dos cálculos originais com vírgula fixa. Por fim, testes de NMSE foram conduzidos para valores de 2, 4, 6, 8, 10 e 15 bits de resolução, cujos resultados são exibidos na Tabela 1. Observou-se que com 15 bits foi possível restaurar os resultados com o mesmo NMSE, para um polinômio de grau 2 e 1 amostra de memória.

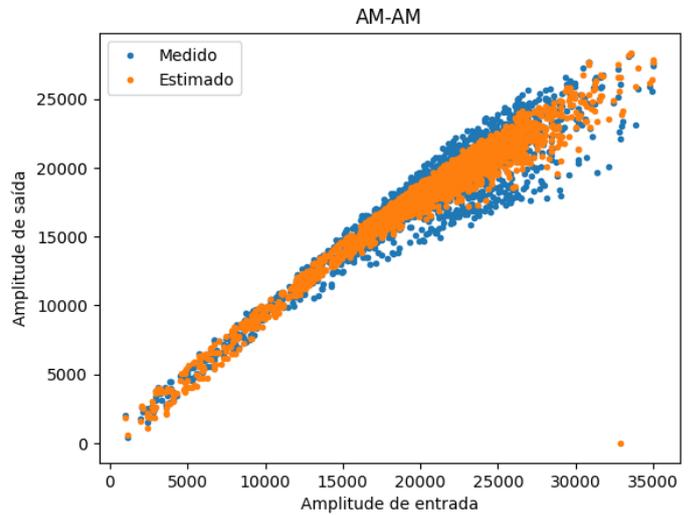


FIGURA 4 – GRÁFICOS PM-PM DO MODELO COM VÍRGULA FIXA

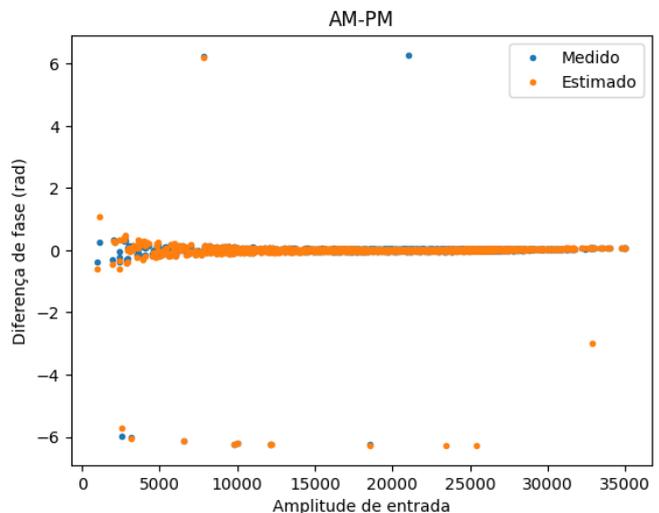


FIGURA 5 - GRÁFICOS AM-PM DO MODELO COM VÍRGULA FIXA

Espera-se também que os gráficos das figuras 3 e 4 sejam semelhantes aos gráficos das figuras 1 e 2, uma vez que o modelo desenvolvido em ambos é o mesmo, a diferença é o primeiro realiza cálculos com números em vírgula flutuante enquanto o segundo é otimizado para realizar operações com vírgula fixa para uma resolução mínima de bits sem perder a confiabilidade do modelo e, portanto, obteve-se os mesmos resultados. Sendo assim, analisando as respectivas figuras nota-se que se obteve o resultado esperado e, logo o modelo apresentado é confiável.

V. CONCLUSÃO

Este trabalho teve por objetivo o estudo dos modelos de PA com o enfoque no uso de um polinômio de memória. Nesse trabalho foi desenvolvido um modelo de um PA com um polinômio de memória de segundo grau com uma amostra de memória. Esse modelo alcançou um NMSE de -23,74 dB, utilizando 33 bits ao todo, sendo 15 de resolução, 17 de overflow, e 1 de sinal.

VI. REFERÊNCIAS

- [1] E. John, "Modelagem comportamental de amplificadores de potência de radiofrequência usando termos unidimensionais e bidimensionais de séries de Volterra," 2016.
- [2] P. Kenington, High Linearity RF Amplifier Design. 2000.
- [3] S. Cripps, RF Power Amplifiers for Wireless Communications. 2006.
- [4] J. H. Chavez, "Estudo comparativo entre as arquiteturas de identificação de pré-distorcedores digitais através das aprendizagens direta e indireta."
- [5] E. Gonçalves de Lima and G. Ghione, "Behavioral modeling and digital base-band predistortion of RF power amplifiers," 2009.
- [6] E. J. Bonfim and E. G. De Lima, "A Modified Two Dimensional Volterra-Based Series for the Low-Pass Equivalent Behavioral Modeling of RF Power Amplifiers," 2016.