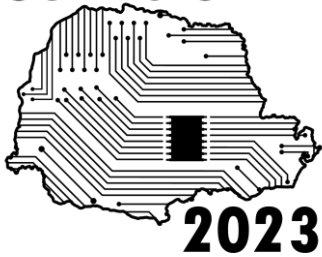


**SeMicro-PR**



# Polinômio com memória tradicional e sua versão alternativa baseando-se nas diferenças entre valores em instantes diferentes

Maria Eduarda Negrelli de Araujo, Sibilla Batista da Luz França, Eduardo Gonçalves de Lima

<sup>1</sup> UFPR, Curitiba, Brasil

<sup>2</sup> Grupo GICS, Curitiba, Brasil

maria.negrelli@ufpr.br

## RESUMO

*Polinômios com memória são algoritmos que, a partir de dados de entrada, estimam um resultado em função da entrada atual e da passada. Nesse projeto, polinômios com memória são aplicados no processamento de dados de entrada e saída de circuitos eletrônicos digitais para a obtenção e análise de gráficos que descrevem seu comportamento. Nesse sentido, o objetivo deste trabalho consiste em realizar um estudo comparando-se polinômios com memória tradicionais a versões alternativas baseando-se nas diferenças entre valores em instantes diferentes. Esses modelos foram implementados em MATLAB utilizando-se de dados previamente disponibilizados de um amplificador de potência (PA). O PA utilizado foi o de classe AB que emprega um transistor HEMT ('High Electron Mobility Transistor' ou 'Transistor de Alta Mobilidade Eletrônica', em português), recebendo um sinal de frequência de 900 MHz. Com esses dados obteve-se resultados que comprovaram que o primeiro polinômio com memória implementado no Matlab é o mais apropriado, pois descreve as curvas comportamentais do PA com menor erro. Para isso, foi comparado o melhor resultado do primeiro com o melhor resultado da forma alternativa, observando-se que o primeiro foi melhor em 55,37%, em termos de redução do MSE ('Mean Square Error', ou 'Erro Quadrático Médio'). Tal método matemático deveria receber a ordem polinomial desejada e a duração de memória dos dados passados, deste modo gerando uma saída melhorada dos dados de entrada. Depois foram feitas alterações nesse modelo matemático, assim, os novos dados obtidos também alteram a previsão dos dados posteriores. Utilizou-se, até então, códigos em vírgula flutuante para a plotagem de gráficos no MATLAB, os quais servem, também, para uma melhor visualização dos resultados obtidos.*

## I. INTRODUÇÃO

O princípio de desenvolvimento de modelos matemáticos para a descrição de curvas comportamentais

de amplificadores de potência (PA) é a grande capacidade de prever, com fidelidade, o desempenho realizado por esses amplificadores que, por sua vez, possuem a finalidade de aumentar a amplitude (ou potência) de um sinal elétrico, fornecendo ganho necessário para diversos dispositivos eletrônicos[1].

Nesse sentido, a criação de algoritmos que possam simplificar o entendimento de sinais amplificados e fenômenos correlacionados prova-se importante no meio de produção acadêmica e tecnológica, por sua utilidade como instrumento de simulação e base para análises e estudos de otimização de projetos. E, para isso, este trabalho utilizará de linguagens de programação como ferramenta de desenvolvimento, a fim de obter e descrever resultados.

Portanto, este trabalho tem por objetivo comparar um polinômio de memória tradicional com uma versão alternativa baseada na diferença entre valores em instantes diferentes.

## II. REVISÃO DE LITERATURA

Amplificadores de potência são, em sua essência, como circuitos eletrônicos estimulados por sinais elétricos que apresentam baixa potência e devolvem os mesmos sinais amplificados por meio da conversão da energia de uma fonte de alimentação em corrente contínua [2]. Porém, muitas vezes ocorrem distorções e diferenças entre os sinais de entrada e saída do amplificador.

No entanto, podemos resolver essa diferença usando ferramentas como a modelagem matemática. Ela desempenha um papel de fundamental importância quando se busca alcançar, com o mais elevado nível de precisão possível, a saída dos dados que foram amplificados pelo amplificador de potência. Nesse contexto, o objetivo primordial é assegurar que o sinal resultante de um amplificador de potência (PA) seja linear, mantendo uma relação de proporcionalidade com o sinal original, e que permaneça análogo a ele, livre de quaisquer distorções ou ruídos indesejados. No entanto, é crucial mencionar que, à

medida que a potência de entrada aumenta, o amplificador de potência (PA) pode apresentar distorções tanto na amplitude quanto na fase do sinal transmitido, o que torna essencial uma modelagem matemática precisa para entender e buscar modos de linearizar essas eventuais perturbações.

Os modelos matemáticos são feitos para se representar fenômenos ou sistemas através de equações, algoritmos e relações matemáticas. Portanto, podemos utilizá-los para representar e modelar o comportamento de amplificadores de potência partindo de dois modelos: modelo físico e o modelo empírico. Para o caso desse trabalho apenas o modelo empírico, ou também modelo comportamental, será desenvolvido, o qual consiste na análise de dados fornecidos pelo amplificador levando em conta as relações entre entrada e saída.

### III. POLINÔMIO DE MEMÓRIA

Polinômios com memória são equações matemáticas que utilizam os valores obtidos anteriormente para determinar os valores posteriores [2]. Originalmente, testou-se um caso particular da ‘Série de Volterra’, onde usam-se dois somatórios. O somatório externo usa a letra  $P$ , que corresponde ao grau do polinômio, e o interno usa a letra  $M$  para expressar a quantidade de memória, conforme a equação 1:

$$Y(n) = \sum_{p=1}^P \sum_{m=0}^M H_{p,m} [in(n-m)]^p \quad (1)$$

Nessa equação  $H_{p,m}$  é o coeficiente do valor fornecido e contabilizado do amplificador. Porém, visando experimentar outro modelo, algumas alterações foram feitas nessa equação.

Nesse novo modelo, o original foi alterado para se fazer a comparação entre os resultados obtidos. Para isso, o código foi manipulado, deixando os mesmos ciclos de looping, porém, realizando nova operação da seguinte forma: para ‘ $m$ ’ igual a zero a operação será a mesma que o modelo original; quando ‘ $m$ ’ for diferente de zero, faz-se uma operação de subtração entre o dado de entrada ‘ $in$ ’ de índice  $(n-m+1)$  e o de índice  $(n-m)$ , e, eleva-se esse número ao valor de ‘ $p$ ’. A equação 2, do novo modelo, encontra-se abaixo:

$$Y(n) = \sum_{p=1}^P H_{p,0} in(n-0)^p + \sum_{p=1}^P \sum_{m=1}^M H_{p,m} [in(n-m+1) - in(n-m)]^p \quad (2)$$

### IV. RESULTADOS

Para o desenvolvimento desse projeto foram utilizados dados coletados de um PA de classe AB que emprega um transistor HEMT (‘High Electron Mobility Transistor’ ou ‘Transistor de Alta Mobilidade Eletrônica’, em português), recebendo um sinal de frequência de 900 MHz e modulado por um sinal de envoltória 3GPP WCDMA com cerca de 3,84 MHz de largura de banda [3]. E, para a análise desses dados, foi utilizado Matlab como software de

processamento das equações dos modelos matemáticos. Este software é um ambiente de programação usado para análise numérica e visualização de dados, que expressa matrizes e arrays, os quais são um conjunto de dados estruturados matematicamente. Até o momento apenas implementou-se códigos utilizando as entradas em vírgula fluante.

A métrica empregada no Matlab para a validação dos modelos foi o MSE (‘Mean Square Error’, ou ‘Erro Quadrático Médio’, em português). O MSE consiste em fazer o somatório do quadrado da diferença do valor de saída medido e o valor estipulado de saída. A equação 3, correspondente ao MSE se encontra abaixo:

$$MSE = \sum_{i=1}^N \frac{|Y_{medido}(i) - Y_{previsto}(i)|^2}{n} \quad (3)$$

No caso desse trabalho, a métrica foi utilizada como ferramenta para apurar os erros de resultado para diferentes modelos e determinar qual apresenta melhor desempenho através da comparação do MSE.

Para os códigos dos dois modelos, loopings foram utilizados para manipular os dados de entrada e obter matrizes que permitiram identificar os coeficientes de cada equação que descreve as curvas de saída do modelo de regressão empregado usando o comando ‘\’, o qual obteve os mínimos quadrados no Matlab. Assim, imitando o comportamento do PA. A Figura 1, representa os resultados obtidos dos dois modelos e dos sinais fornecidos de saída do amplificador pelos sinais de entrada.

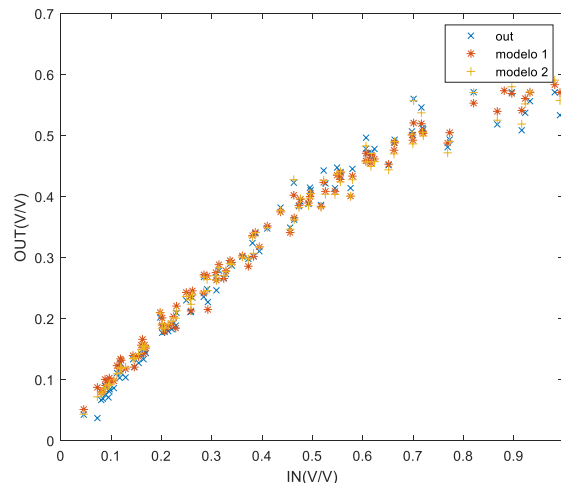


FIGURA 1. GRÁFICO DOS RESULTADOS

Nesse gráfico, podemos identificar ‘x’ como as saídas do PA fornecidas, ‘\*’, são as saídas do primeiro modelo e ‘+’ as saídas obtidas do segundo modelo. E, para identificar qual dos dois modelos era o mais apropriado foi montada a Tabela 1 de MSEs calculados para várias combinações de ordem polinomial  $P$  e memória  $M$ . Para fins de teste, os valores de  $P$  e  $M$ , 4 e 2, respectivamente,

foram escolhidos de modo a serem suficientes para a comparação dos dois modelos.

TABELA 1: MSEs PARA DIFERENTES MODELOS

Valores de memória e de ordem polinomial		MSE com o primeiro modelo	MSE com o segundo modelo
P:1	M:1	21,0753e-04	21,07532e-04
P:1	M:2	19,7965e-04	19,7965e-04
P:2	M:1	1,2213e-04	2,1086e-04
P:2	M:2	9,7284e-05	1,4812e-04
P:3	M:1	3,7853e-05	9,9817e-05
P:3	M:2	3,3817e-05	6,0175e-05
P:4	M:1	3,5327e-05	9,5603e-05
P:4	M:2	3,1858e-05	5,7531e-05

Com essa tabela podemos identificar o menor MSE obtido, o qual corresponde à ordem polinomial P:4 e à memória M:2 do primeiro modelo. Logo, podemos concluir que o melhor modelo é o primeiro testado.

Além disso, pode-se notar que, quando P e M são iguais a 1 em ambos os modelos, serão obtidos apenas 2 coeficientes em cada um fazendo-se uma combinação linear entre a entrada atual e passada. Podemos dizer que os coeficientes da primeira equação são a1 e a2 na equação resultante:  $a1 \cdot x(n) + a2 \cdot x(n-1)$ ; e os da segunda equação são b1 e b2 na equação resultante:  $b1 \cdot x(n) + b2[x(n) - x(n-1)]$ . O que implica na igualdade dessas duas equações quando  $b2 = -a2$  e  $b1 = a1 - b2$ .

Os resultados também podem ser visualizados através do gráfico apresentado na Figura 2. Nele, os círculos representam os resultados do MSE do primeiro modelo e 'x', do segundo. Quanto mais próximo de zero é o MSE, melhor é o modelo usado.

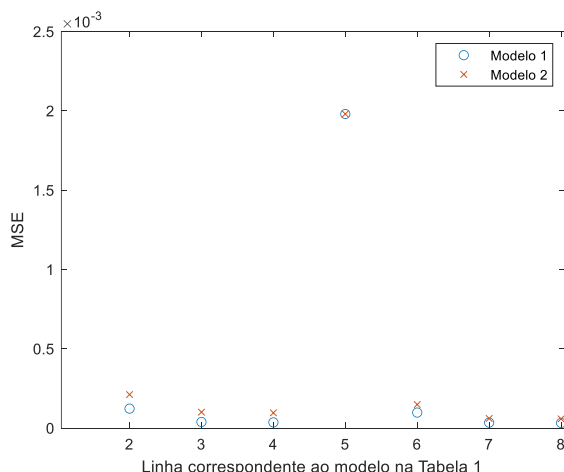


FIGURA 2. MSE DOS MODELOS COMPARADOS

## V. CONCLUSÃO

Nesse trabalho foram desenvolvidos algoritmos para comprovar a importância de modelos matemáticos para a descrição comportamental de amplificadores de potência (PA), e experimentadas técnicas de obtenção de valores de saída esperados para determinadas entradas de sinais elétricos. Portanto, pode-se concluir que usando os valores previamente fornecidos de um amplificador de potência, esses algoritmos podem ser usados para estimar o comportamento de saída dos sinais em um PA, e provou-se com os resultados que o primeiro modelo de algoritmo é melhor do que o segundo, pois apresenta um MSE ('Mean Square Error') mais próximo de zero do que o segundo. Posteriormente, pretende-se descrever o modelo mais apropriado em Linguagem de Descrição de Hardware (HDL).

## AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi desenvolvido no âmbito do Programa PIBIC-IC Voluntária UFPR 2022.

## REFERÊNCIAS

- [1] P. B. Kenington, High Linearity RF Amplifier Design. Norwood, MA: Artech House, 2000.
- [2] J. Kim and K. Konstantinou, "Digital predistortion of wideband signals based on power amplifier model with memory," Electron. Lett., vol. 37, no. 23, pp. 1417–1418, Nov. 2001.
- [3] 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.