

Modelagem Comportamental de Amplificadores de Potência

Usando Truncamento Polinomial Dependente do Atraso

Leonardo de Andrade Santos, Eduardo Gonçalves de Lima

Universidade Federal do Paraná

2026



Outline

- **Introdução**
- Fundamentação Teórica
- Resultados
- Próximas Etapas
- Bibliografia

Contextualização e Motivação

- Evolução dos sistemas de comunicação sem fio exige altas taxas de dados em largura de banda limitada
- Modulações complexas (ex.: OFDM, QAM elevada) → variação simultânea de amplitude e fase
- Essas modulações são altamente sensíveis às não-linearidades dos amplificadores de potência RF (**PA**)
- PA é o principal consumidor de energia do transmissor
- Máxima eficiência energética → operação próxima da saturação
- Consequência: forte distorção não-linear + efeitos de memória
- Resultado: regrowth espectral, piora de EVM, ACLR e BER

Solução consolidada: Pré-Distorção Digital (DPD) em banda-base para compensar a não-linearidade do PA

- Eficácia da DPD depende de modelo matemático preciso e de baixa complexidade
- Necessidade: estruturas de modelagem que conciliem precisão, baixa complexidade e viabilidade em hardware

Objetivos

Objetivo Geral Investigar, em software Python, estruturas alternativas do modelo Memory Polynomial (MP) para modelagem comportamental de amplificadores de potência (PA), com ênfase em ordens polinomiais dependentes do atraso e abordagens híbridas (MP + LUT), avaliando o compromisso entre precisão e complexidade computacional.

Objetivos Específicos

1. Implementar o modelo Memory Polynomial clássico em Python
2. Desenvolver variação do MP com ordens polinomiais dependentes do atraso
3. Avaliar desempenho dos modelos via Normalized Mean Squared Error (NMSE)
4. Analisar trade-off complexidade × precisão utilizando fronteira de Pareto
5. Propor e comparar abordagem híbrida (polinômios nos ramos de memória + LUT no termo corrente)

Outline

- Introdução
- **Fundamentação Teórica**
- Resultados
- Próximas Etapas
- Bibliografia

Fundamentação Teórica

Sistema de Comunicação Sem Fio

- Sistemas modernos sem fio: transmissor → meio de propagação → receptor
- Foco exclusivo deste trabalho: subsistema transmissor
- Bloco crítico: Amplificador de Potência em RF (PA / PARF)
 - Maior consumidor de energia do transmissor
 - Converte energia CC (fonte) em potência RF irradiada pela antena
 - Eficiência global do transmissor depende diretamente do PA

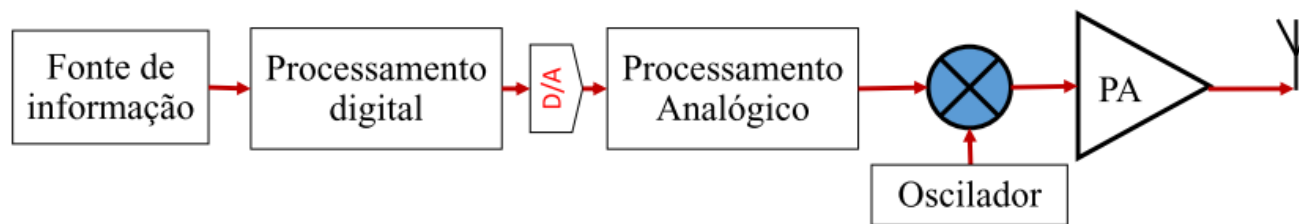


Figura 1: Sistema de transmissão simplificado

Distorção Espectral e Restrições Normativas

- Sistemas sem fio sujeitos a restrições normativas rigorosas de emissão espectral
- Máscara espectral limita potência máxima em bandas adjacentes (ex.: ACLR, SEM)
- Não-linearidade do PA gera produtos de intermodulação (IMD) e regrowth espectral
- Operação em regiões de alta eficiência → intensificação das distorções fora da banda
- Consequência: risco de interferência em canais vizinhos e não conformidade regulatória

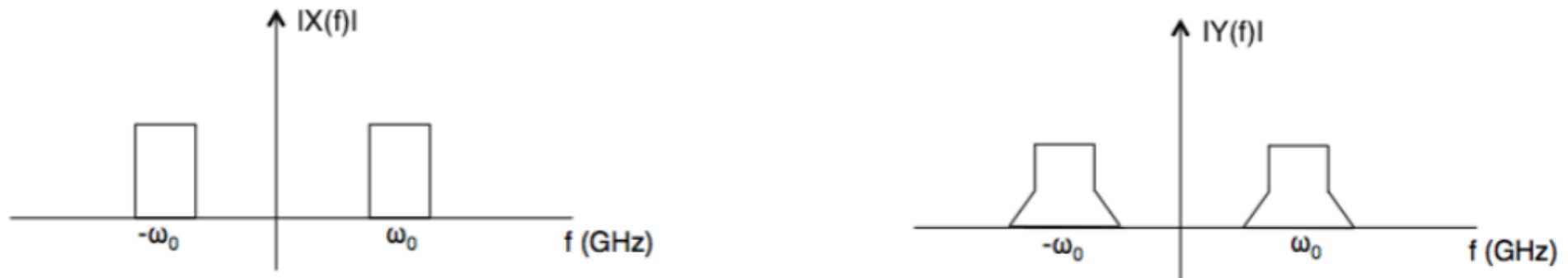


Figura 2: Exemplo de máscara espectral e distorções adjacentes

Distorções em Amplificadores de Potência

- PA apresenta comportamento não linear em altos níveis de potência (compressão e saturação)
- Linearidade avaliada principalmente pelo ponto de compressão de 1 dB (P1dB)
- Componentes reativos no circuito (bias, matching) introduzem efeitos de memória
- Efeitos de memória degradam significativamente sinais de larga banda (ex.: OFDM, 5G)
- Resultado: distorções AM/AM, AM/PM e regrowth espectral

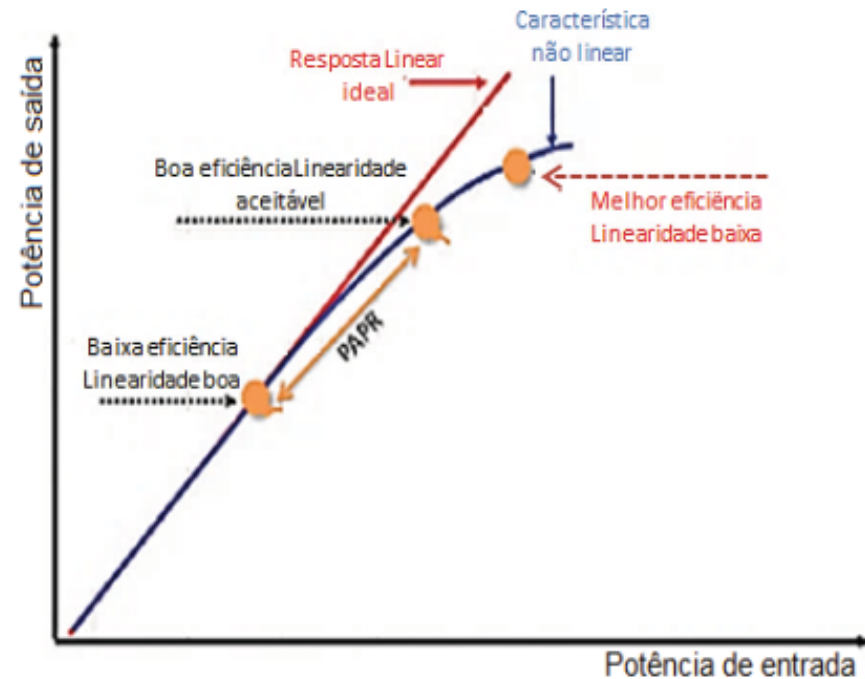


Figura 3: Curva de transferência de um PARF

Pré-Distorção Digital (DPD)

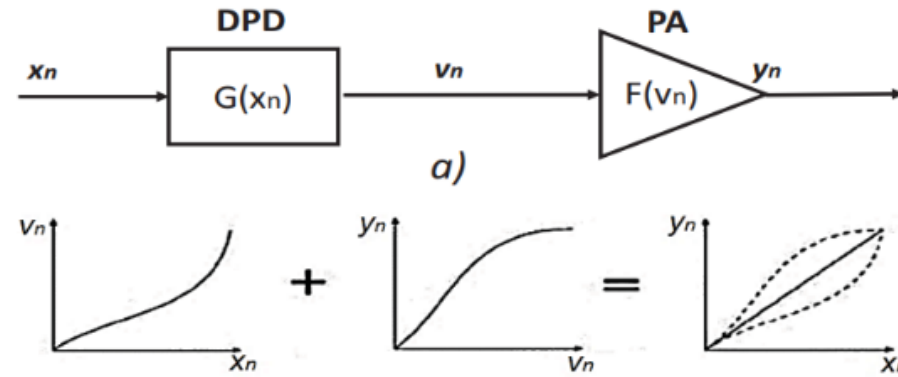


Figura 4: Esquema de pré-distorção digital (DPD) em cascata com o amplificador de potência

- DPD aplica distorção controlada no sinal em banda-base (digital)
- Função de transferência do DPD \approx inversa da não-linearidade do PA
- Resultado: conjunto DPD + PA apresenta comportamento quase linear
- Permite operação do PA em região de alta eficiência sem violação de máscaras espectrais
- Bom compromisso entre desempenho (linearidade, EVM, ACLR) e custo de implementação

Modelagem Comportamental

- Modelagem baseada exclusivamente na relação observável entre entrada e saída do PA
- Não requer conhecimento da topologia interna ou parâmetros físicos do dispositivo
- Capaz de representar não-linearidades (AM/AM, AM/PM) e efeitos de memória (dispersão térmica, bias, matching)
- Ampla adoção em sistemas de pré-distorção digital (DPD) industriais e acadêmicos

Principais vantagens:

- Facilidade de extração de parâmetros a partir de medições
- Boa generalização para sinais reais (larga banda, alta PAR)
- Implementação eficiente em hardware digital (FPGA/ASIC)

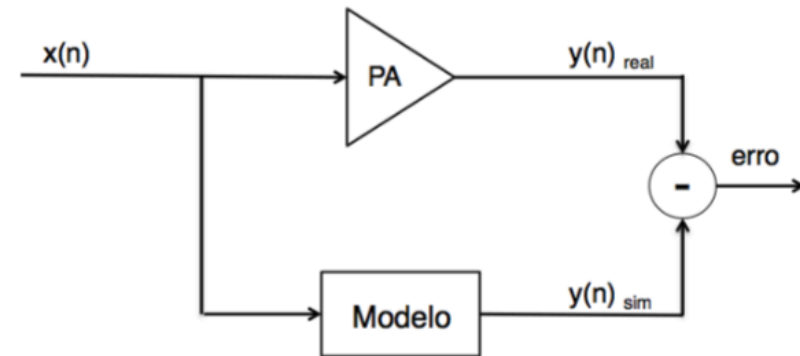


Figura 5: Diagrama genérico de modelagem comportamental

Séries de Volterra

- Extensão da série de Taylor para sistemas não lineares dinâmicos
- Modela não-linearidades e efeitos de memória de forma geral
- Alta capacidade de aproximação teórica
- Principal desvantagem: elevada complexidade computacional (número de termos cresce exponencialmente)

$$y(n) = \sum_{k=1}^K \sum_{m_1=0}^{M-1} \dots \sum_{m_k=0}^{M-1} h_{k(m_1, \dots, m_k)} \prod_{i=1}^k x(n - m_i)$$

Equação 2.2 – Série de Volterra discreta

Polinômio com Memória

- Simplificação da série de Volterra
- Considera apenas os termos diagonais (mesmo atraso em todas as multiplicações)
- Modelo compacto e linear nos coeficientes (fácil identificação)
- Amplamente utilizado em sistemas de pré-distorção digital (DPD)

$$y(n) = \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{k=1}^K a_{\{km\}} |x(n-m)|^{k-1} x(n-m)$$

Equação 2.3 – Modelo Memory Polynomial (MP)

Alternativa Proposta: MP com Ordem Variável

- Formulação tradicional do MP: ordem polinomial máxima P uniforme para todos os atrasos
- Essa restrição não é imposta pela série de Volterra → pode gerar complexidade desnecessária
- Termos de atrasos mais elevados: efeitos não lineares geralmente menos pronunciados
- Proposta: adotar ordens polinomiais diferenciadas em função do atraso de memória
 - Reduz complexidade computacional
 - Mantém capacidade de representação do PA
- Para implementação em hardware (altas taxas de amostragem):
 - Exploração de arquiteturas paralelizáveis
 - Substituição de multiplicações por tabelas de consulta (LUTs) nos termos mais complexos
- Abordagem híbrida: LUT no termo corrente ($m=0$) + polinômios nos termos de memória ($m \geq 1$)
 - Maior eficiência em FPGA/ASIC
 - Menor consumo de recursos e latência

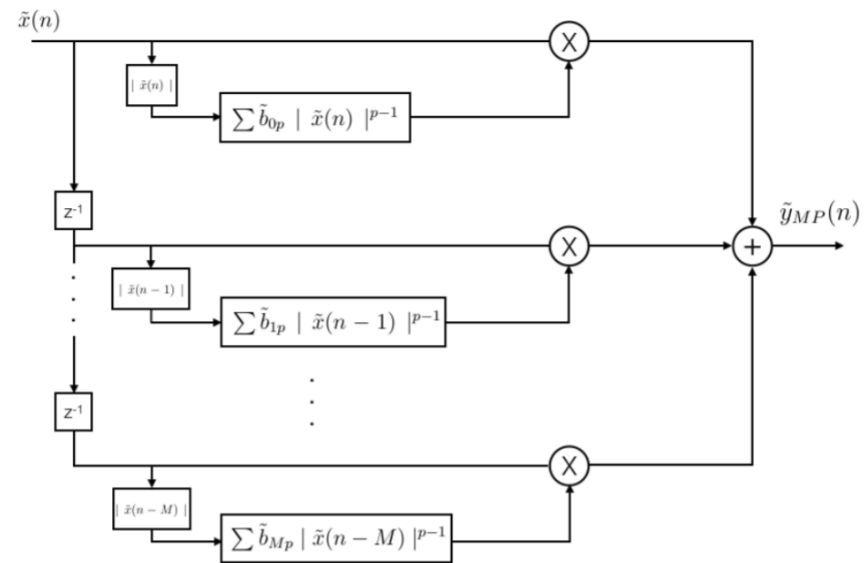


Figura 6: Diagrama de blocos do modelo Memory Polynomial (MP) clássico (Figura 7)

Abordagem Híbrida: Polinômios + Tabelas de Consulta (LUTs)

- Termo corrente ($m = 0$) concentra a maior parte da complexidade não linear
- Substituição por LUT (Look-Up Table) no termo atual:
 - Alta precisão com alta ordem polinomial
 - Elimina multiplicações pesadas
 - Acesso rápido em hardware (FPGA/ASIC)
- Ramos de memória ($m \geq 1$): mantidos como polinômios de baixa ordem
 - Reduz número de coeficientes e operações
 - Menor impacto na precisão total

Vantagens da abordagem híbrida:

- Menor consumo de recursos lógicos (multiplicadores)
- Menor latência e maior paralelismo
- Bom trade-off precisão \times complexidade computacional
- Viável para implementação em alta taxa de amostragem

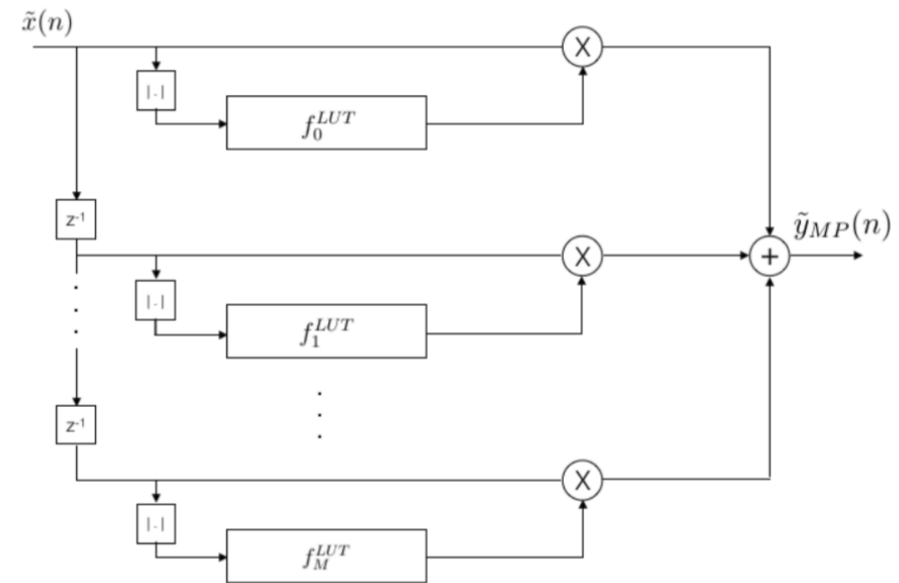


Figura 7: Implementação do modelo MP utilizando LUTs (Figura 8)

Outline

- Introdução
- Fundamentação Teórica
- **Resultados**
- Próximas Etapas
- Bibliografia

Resultados – Visão Geral

- Validação inicial das estruturas propostas na Seção 3.2
- Foco principal: modelo Memory Polynomial (MP) clássico em ponto flutuante
- Resultados preliminares → baseline para comparação futura
- Modelos com ordem dependente do atraso e híbrido (MP + LUT) ainda em implementação
- Métrica principal: Normalized Mean Square Error (NMSE) – Eq. (4.1)
- Dados: medições reais de PA classe AB GaN HEMT a 900 MHz com WCDMA (3,84 MHz)
- Aquisição: analisador vetorial de sinais (VSA) Rohde & Schwarz @ 61,44 MSps



Figura 8: Analisador vetorial de sinais (VSA)

Métrica de Desempenho: NMSE

- $e(n) = y_{\text{real}}(n) - y_{\text{model}}(n)$
- $y_{\text{real}}(n)$: saída medida do PA real
- $y_{\text{model}}(n)$: saída calculada do modelo MP
- N: número total de amostras
- Quanto menor o NMSE (mais negativo em dB), melhor a precisão
- Avaliação em conjunto de validação separado do treinamento (evita sobreajuste)

$$\text{NMSE} = 10 \log_{10} \left(\frac{\sum_{n=1}^N |e(n)|^2}{\sum_{n=1}^N |y_{\text{real}}(n)|^2} \right)$$

Equação (4.1) – Normalized Mean
Square Error

Modelagem do PA com MP Original

- Implementação em Python (ponto flutuante)
→ alta precisão numérica
- Objetivo: estabelecer baseline de desempenho
- Identificação: mínimos quadrados sobre erro de modelagem
- Validação em dados independentes (evita sobreajuste)

Resultado: NMSE = $-26,7$ dB Boa capacidade de representação do PA real em banda larga

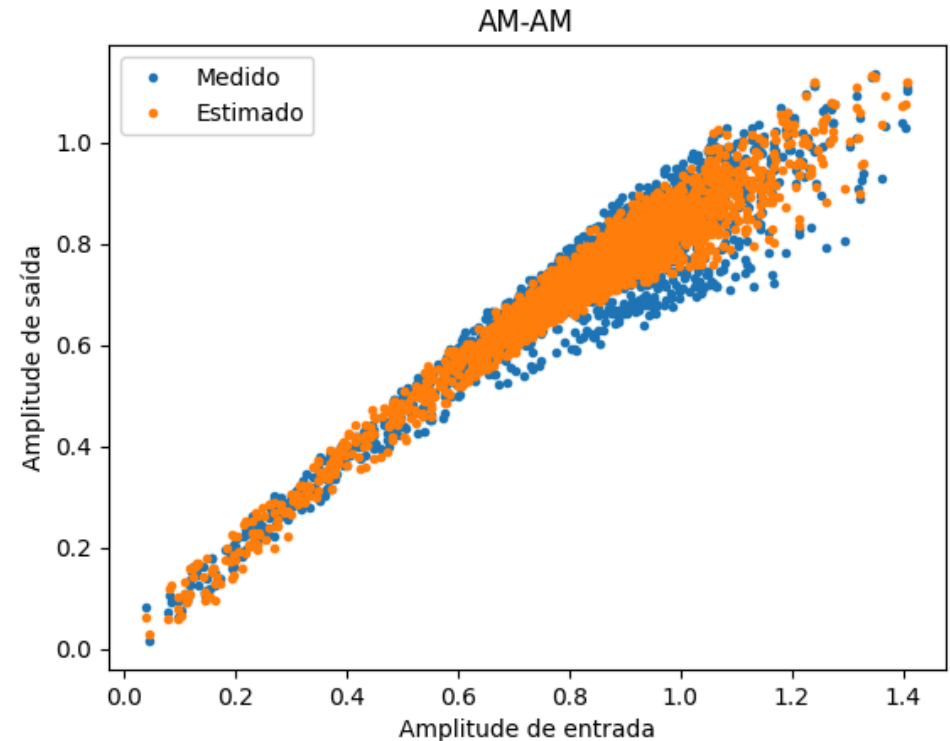


Figura 9: Modelo do PA com MP Original

MP com Ordem Dependente do Atraso

- Profundidade de memória $M = 2$
- Ordens: P_0, P_1, P_2 variando de 1 a 5 \rightarrow 125 combinações
- Treinamento em ponto flutuante
- Métricas avaliadas: NMSE e número total de coeficientes
- Aumento do número de coeficientes melhora NMSE
- Mas não é o único fator determinante
- Distribuição das ordens entre os atrasos é crítica para o desempenho

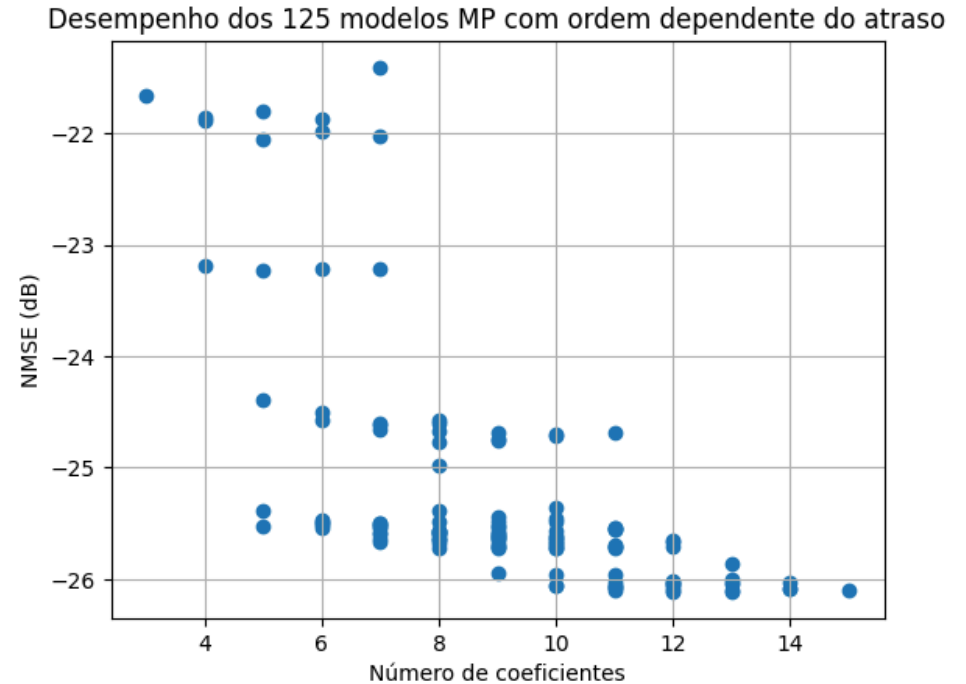
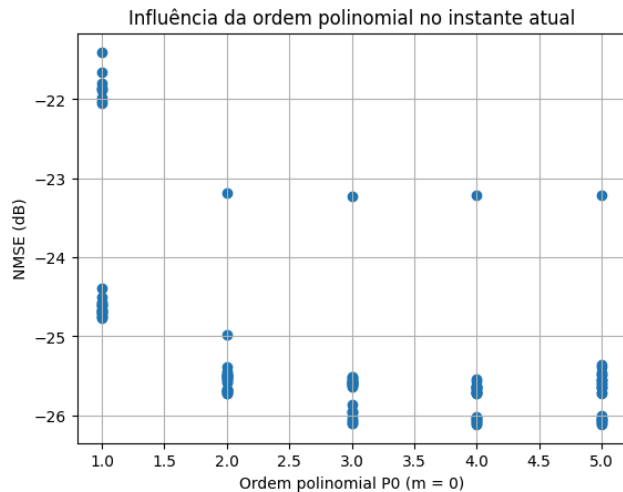
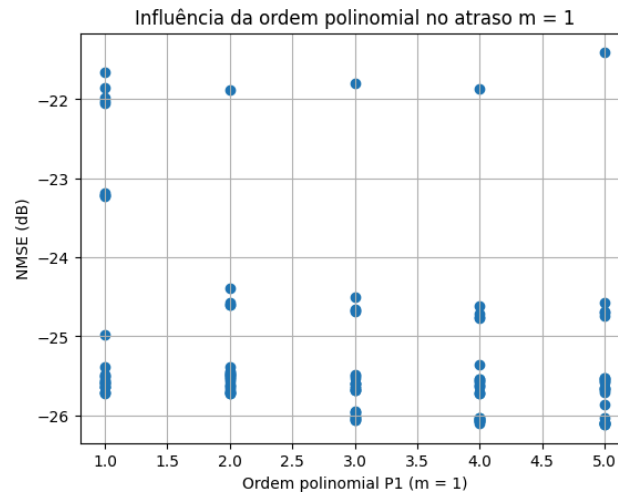
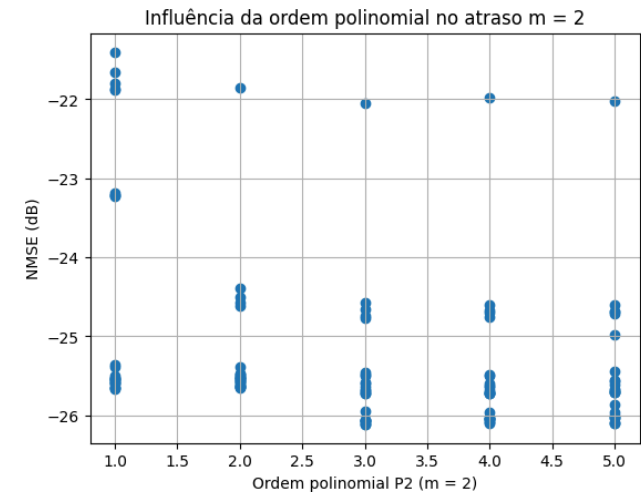


Figura 10: Desempenho dos 125 modelos MP com ordem dependente do atraso

Influência da Ordem Polinomial por Atraso

- P_0 ($m=0$): forte redução de NMSE com aumento da ordem
- P_1 ($m=1$): impacto moderado
- P_2 ($m=2$): impacto muito limitado

Figura 11: P_0 Figura 12: P_1 Figura 13: P_2

Não-linearidade dominante concentrada no instante atual

NMSE em Função da Complexidade

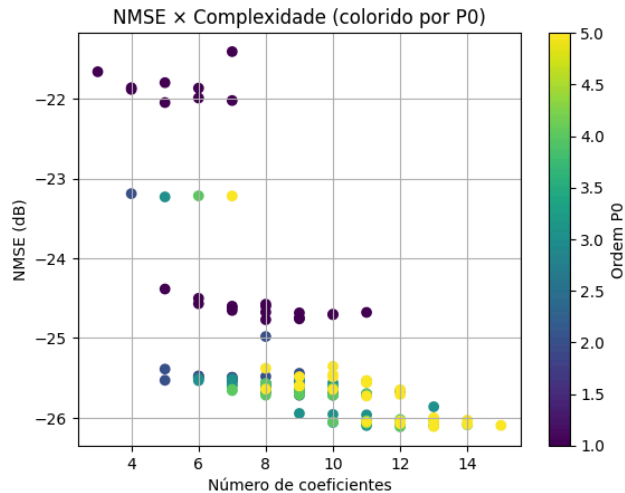


Figura 14: Destacando P₀

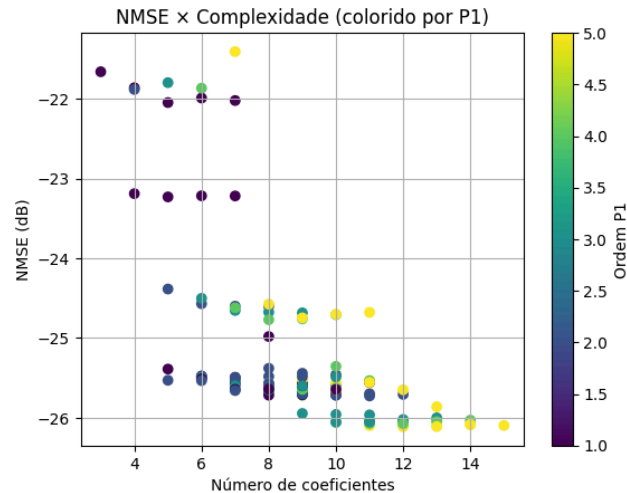


Figura 15: Destacando P₁

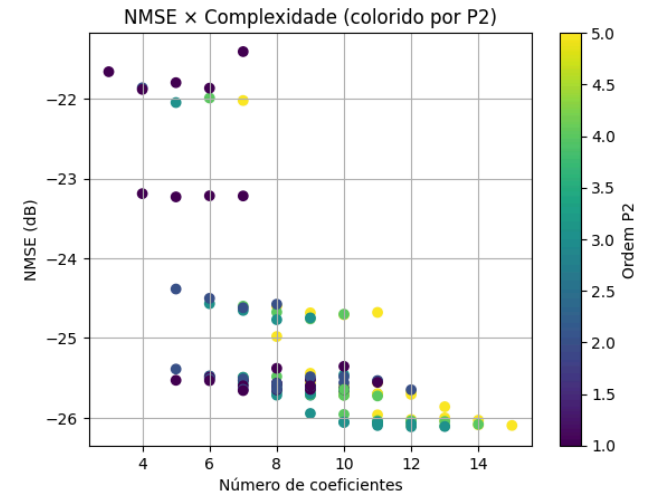


Figura 16: Destacando P₂

Ordem P₀ é o principal driver de ganho de precisão Aumento em atrasos antigos traz ganhos marginais

Modelos com $P_0 \geq P_1 \geq P_2$

- Modelos com ordens polinomiais decrescentes ao longo dos atrasos ($P_0 \geq P_1 \geq P_2$)
- Maioria dos modelos com melhor desempenho pertence a esse grupo
- Indica que a complexidade deve ser priorizada no instante atual ($m = 0$)
- Redução progressiva da ordem nos atrasos mais antigos traz pouco prejuízo

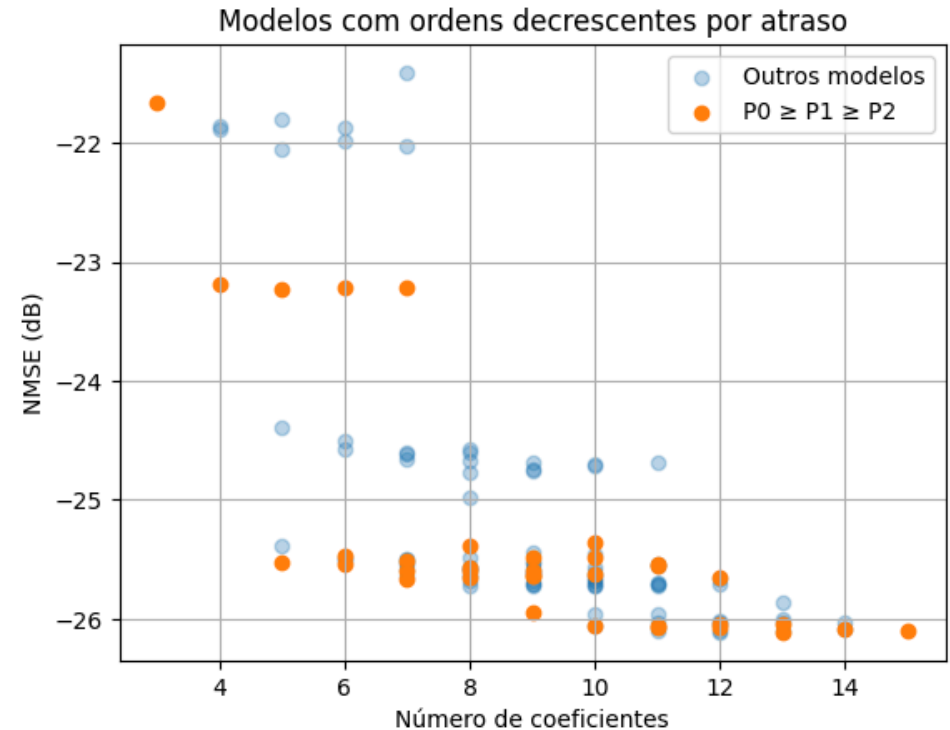


Figura 17: Modelos com ordens polinomiais decrescentes ao longo dos atrasos

Fronteira de Pareto

- Trade-off entre precisão (NMSE) e complexidade (número de coeficientes)
- Modelos na fronteira: soluções mais eficientes (melhor NMSE com menor complexidade possível)
- Distribuição típica dos melhores modelos: alta ordem em $m=0$ + redução rápida em $m \geq 1$
- Confirma que a não-linearidade dominante está concentrada no instante atual

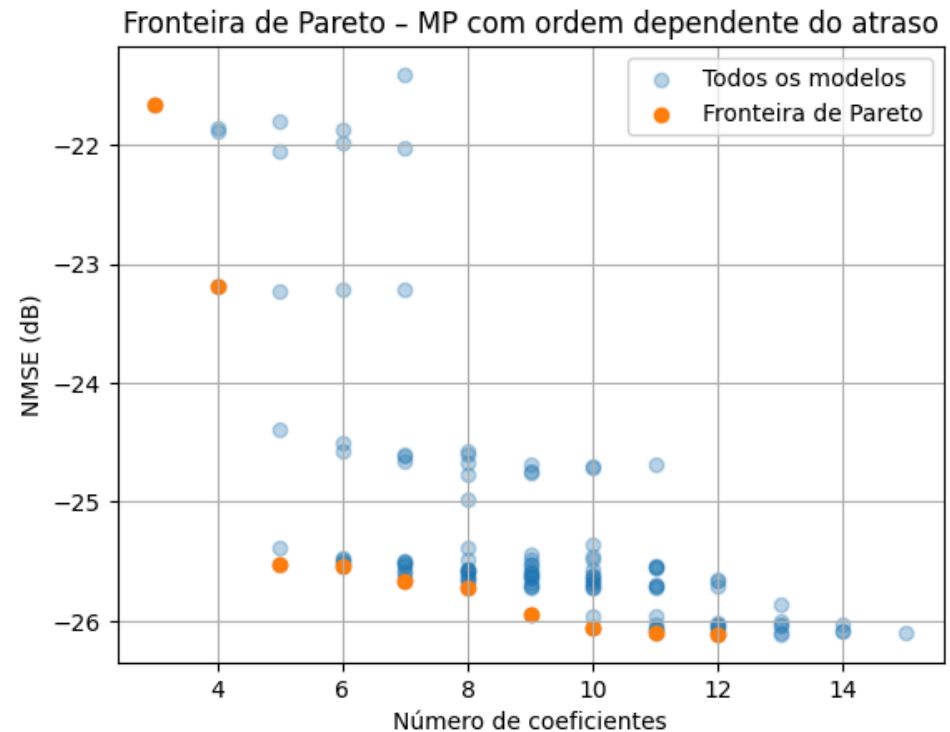


Figura 18: Fronteira de Pareto para os modelos MP com ordem dependente do atraso

Implementação Conceitual com LUTs

- Análise arquitetural da substituição de operações por LUTs
- Foco: redução de complexidade em alta taxa de amostragem
- Abordagem seletiva: LUTs nos termos de maior ordem
- Resultados quantitativos (NMSE, recursos FPGA) → etapas futuras
- Implementação prática ainda em andamento

Outline

- Introdução
- Fundamentação Teórica
- Resultados
- **Próximas Etapas**
- Bibliografia

Próximas Etapas

A partir dos resultados obtidos com a modelagem comportamental híbrida — combinando Polinômio com Memória (MP) com ordens dependentes do atraso e o uso de LUTs priorizadas no termo corrente — as próximas etapas concentram-se no aprofundamento da validação em ambiente de simulação.

Entre as direções futuras, destacam-se:

- Avaliação mais abrangente do modelo híbrido utilizando diferentes sinais modulados e diferentes níveis de não linearidade do PA;
- Análise do impacto da granularidade e da estratégia de interpolação das LUTs na precisão da modelagem (NMSE);
- Investigação de critérios sistemáticos para definição das ordens polinomiais dependentes do atraso;

Próximas Etapas

- Expansão da análise multiobjetivo baseada na fronteira de Pareto, incorporando métricas adicionais relacionadas à complexidade computacional;
- Comparação detalhada entre as abordagens puramente polinomial, puramente LUT e híbrida sob diferentes cenários operacionais.

Essas etapas visam consolidar a proposta como uma alternativa computacionalmente eficiente para modelagem e pré-distorção digital de amplificadores de potência em sistemas modernos de comunicação sem fio.

Obrigado pela atenção!

Referências

Bibliografia

- [1] S. C. Cripps, *RF power amplifiers for wireless communications*. Artech House, 2006, p. 456.
- [2] E. John, «Modelagem comportamental de amplificadores de potência de radiofrequência usando termos unidimensionais e bidimensionais de séries de Volterra», Master's thesis, 2016.
- [3] J. H. Chavez, «Estudo comparativo entre as arquiteturas de identificação de pré-distorcedores digitais através das aprendizagens direta e indireta», Master's thesis, 2018.
- [4] E. G. de Lima e G. Ghione, «Behavioral modeling and digital base-band predistortion of RF power amplifiers», Doctoral dissertation, 2009.
- [5] P. Kenington, *High Linearity RF Amplifier Design*. Artech House Publishers, 2000.
- [6] C. Luiza e R. Machado, «Modelagem comportamental de amplificadores de potência usando soma de produtos entre filtros digitais de resposta ao impulso finita e tabelas de busca unidimensionais», Master's thesis, 2016. [Em linha]. Disponível em: <https://acervodigital.ufpr.br/xmlui/bitstream/handle/1884/46250/R%20-%20D%20-%20CAROLINA%20LUIZA%20RIZENTAL%20MACHADO.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [7] L. Schuartz e E. Lima, «Polinômios com Memória de Complexidade Reduzida e sua Aplicação na Pré-distorção Digital de Amplificadores de Potência», Master's thesis, 2017.
- [8] J. Kim e K. Konstantinou, «Digital predistortion of wideband signals based on power amplifier model with memory», *Electronics Letters*, vol. 37, n.º 23, pp. 1417–1418, 2001, doi: [10.1049/el:20010940](https://doi.org/10.1049/el:20010940).
- [9] A. Kwan, F. Ghannouchi, O. Hammi, M. Helaoui, e M. Smith, «Look-up table-based digital predistorter implementation for field programmable gate arrays using long-term evolution signals with 60 MHz bandwidth», *IET Science, Measurement & Technology*, vol. 6, n.º 3, pp. 181–188, 2012, doi: [10.1049/iet-smt.2011.0025](https://doi.org/10.1049/iet-smt.2011.0025).
- [10] E. J. Bonfim e E. G. 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, pp. 27–35, 2016, doi: [10.2528/PIER-M15122806](https://doi.org/10.2528/PIER-M15122806).