

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

THONNY GUILHERME FERRAZ

MODELO COMPORTAMENTAL PARA LINEARIZAÇÃO DE AMPLIFICADOR DE
POTÊNCIA MULTIMODOS USANDO GMDH

CURITIBA

2025

THONNY GUILHERME FERRAZ

MODELO COMPORTAMENTAL PARA LINEARIZAÇÃO DE AMPLIFICADOR DE
POTÊNCIA MULTIMODOS USANDO GMDH

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao Curso de Graduação em Engenharia
Elétrica como requisito parcial à obtenção do
título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Eduardo Gonçalves de
Lima

CURITIBA
2025

RESUMO

Este trabalho propõe a criação de um modelo comportamental voltado à linearização de amplificadores de potência multimodos utilizando o método GMDH. A abordagem visa mitigar os efeitos não lineares introduzidos por amplificadores operando próximos à saturação, mantendo a eficiência energética sem comprometer a linearidade do sinal. Para isso, desenvolveu-se uma adaptação da função de ativação do GMDH ao domínio complexo, representando os sinais de envoltória com maior precisão. O desempenho do modelo proposto é comparado ao método Decomposed Piecewise, frequentemente utilizado em aplicações de pré-distorção digital. As simulações foram realizadas no software GNU Octave, com validação baseada no erro médio quadrático normalizado. O resultado encontrado para a modelagem comportamental do amplificador de potência, utilizando a métrica NMSE, foi o valor de -39,047 dB. Este resultado é comparado com o método Decomposed Piecewise, em que foi obtido -38,916 dB. Enquanto os valores nesta métrica são semelhantes, é importante considerar o número de coeficientes utilizados por cada método. Nesta comparação, o método GMDH teve um resultado pior por apresentar um alto número de coeficientes (108) em relação ao Decomposed Piecewise (45).

Palavra-chave: Amplificador de potência, Linearização, GMDH.

ABSTRACT

This work proposes a behavioral modeling approach for linearizing multimode power amplifiers using the Group Method of Data Handling. The goal is to mitigate nonlinear effects introduced by power amplifiers operating near saturation, while maintaining energy efficiency without compromising signal linearity. To achieve this, the GMDH activation function was adapted to the complex domain, allowing more accurate envelope signal representation. The performance of the proposed model is compared to the widely used Decomposed Piecewise method for digital predistortion applications. Simulations were conducted using GNU Octave, with validation based on the normalized mean square error. The result found for the behavioral modeling of the power amplifier, using the NMSE metric, was -39.047 dB. This result is compared with the Decomposed Piecewise method, where -38.916 dB was obtained. While the values in this metric are similar, it is important to consider the number of coefficients used by each method. In this comparison, the GMDH method had a worse result because it had a higher number of coefficients (108) than the Decomposed Piecewise (45).

KEYWORD: Power amplifier, Linearization, GMDH.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Sistema RF genérico Fonte: (RAZAVI, 1997)	10
Figura 2 - Compressão de ganho – Fonte: (RAZAVI, 1997)	11
Figura 3 – Fenômeno de Intermodulação - Adaptado de: (ZUMBAHLEN, 2008).....	13
Figura 4 – Bloco de diagrama do GMDH – FONTE: (Machado, 2022)	16
Figura 5 Topologia para o PA multimodo usando GMDH - Fonte: Autor (2025)	20
Figura 6 - Amplitude de saída em função da amplitude de entrada usando o MP - Fonte: Autor (2025)	22
Figura 7 - Amplitude de saída em função da amplitude de entrada usando o GMDH - Fonte: Autor (2025)	23
Figura 8 – Diferença entre fase de saída e de entrada em função da amplitude de entrada usando o MP – Fonte: Autor (2025)	23
Figura 9 Diferença entre fase de saída e de entrada em função da amplitude de entrada usando o GMDH – Fonte: Autor (2025).....	24
Figura 10 - Amplitude de saída por amostra usando o MP - Fonte: Autor (2025)	24
Figura 11 - Amplitude de saída por amostra usando o GMDH - Fonte: Autor (2025)	25
Figura 12 - Erro relativo para cada amostra usando o MP - Fonte: Autor (2025).....	25
Figura 13 - Erro relativo para cada amostra usando o GMDH - Fonte: Autor (2025)	26

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Comparação entre os métodos de modelagem	26
---	----

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

DPD – Digital Predistorter

BP – Band-Pass

LPE – Low-pass equivalent

MP - Memory Polynomial

NMSE - Normalized Mean Square Error

PA - Power Amplifier

GMDH - Group Method of Data Handling

IoT - Internet of things

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	9
1.1 MOTIVAÇÃO	9
1.2 OBJETIVOS	10
1.2.1 Objetivos Específicos	10
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	10
2.1 AMPLIFICADOR DE POTÊNCIA	10
2.2 EFICIÊNCIA	11
2.3 EFEITOS CAUSADOS PELA NÃO-LINEARIDADE	12
2.4 ABORDAGENS EM RELAÇÃO AO MODELO	13
2.5 MODELAGEM COMPORTAMENTAL DE UM AMPLIFICADOR DE POTÊNCIA EQUIVALENTE PASSA-BAIXA	14
2.6 GMDH	15
2.7 MODELOS PARA MÚLTIPLOS MODOS DA LITERATURA	18
3. PROPOSTA	18
4. METODOLOGIA	21
4.1 SOFTWARE UTILIZADO	21
4.2 MÉTRICAS UTILIZADAS	21
4.3 DADOS UTILIZADOS	21
5. RESULTADOS	22
6. CONCLUSÃO	27
7. REFERÊNCIAS	28

1. INTRODUÇÃO

1.1 MOTIVAÇÃO

Uma revolução informacional está acontecendo diariamente. Dispositivos de IoT criam uma enxurrada de informações que devem ser transmitidas, armazenadas e analisadas por dezenas de aplicações que vão desde a agricultura à indústria. O número de dispositivos IoT conectados em 2023 superou a marca de 16,6 bilhões (SINHA, 2024).

Uma parcela desses dispositivos tem acesso à apenas uma fonte de energia limitada na forma de baterias. Os sistemas direcionados para este tipo de aplicação devem ser muito eficientes em relação à utilização da energia. Na busca de otimizar o consumo, encontramos o bloco de amplificador de potência que é um dos blocos que consomem mais energia no sistema de radiofrequência. Entretanto, ao realizar uma análise de melhorias desse bloco, encontramos que a relação entre eficiência e linearidade do amplificador estão em desacordo entre elas. A região em que o amplificador pode trabalhar com melhor eficiência é a região em que a sua linearidade é comprometida por efeitos de compressão de ganho. Essa compressão gera efeitos indesejados como alargamento da banda, sendo estes inadmissíveis perante os rigores das normas quanto à utilização do espectro de radiofrequências.

Com estas informações em mente, é preciso utilizar técnicas que garantem a linearidade do amplificador de potência com uma alta eficiência. Uma solução que tem sido utilizada é a adição de um bloco em cascata com o amplificador de potência que realiza uma operação que garanta o sinal linear na saída do PA.

1.2 OBJETIVOS

O foco deste trabalho é explorar a modelagem comportamental de amplificadores de potência baseada em redes neurais do tipo GMDH (Método de grupo de tratamento de dados) em um novo contexto de amplificadores multimodos.

1.2.1 Objetivos Específicos

O principal objetivo é estender o modelo GMDH para que seja possível utilizá-lo de forma precisa em PAs multimodos e comparar as precisões de um modelo comportamental de PA utilizando polinômios com memória com um modelo utilizando GMDH em um cenário multimodos.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Esta seção visa esclarecer os principais conceitos para o entendimento desta monografia.

2.1 AMPLIFICADOR DE POTÊNCIA

Os amplificadores de potência são os blocos nos transceptores de RF, conforme mostra a Figura 1, que mais consomem energia nesse sistema (RAZAVI, 1997).

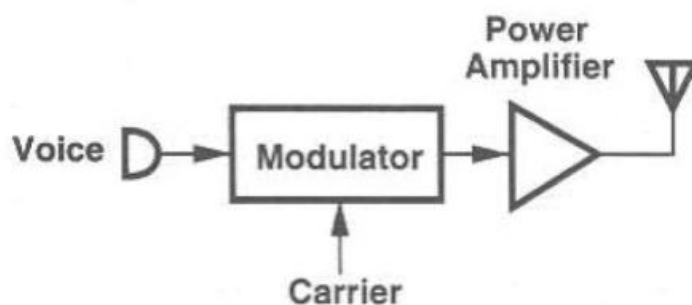


Figura 1 - Sistema RF genérico Fonte: (RAZAVI, 1997)

Os amplificadores de potência são responsáveis por amplificar os sinais de RF para níveis adequados de transmissão, convertendo a energia DC fornecida pela fonte de alimentação em potência de RF de saída, com máxima eficiência e

mínima distorção (THANGASAMY, 2014). Examinaremos os conceitos de eficiência e linearidade.

2.2 EFICIÊNCIA

A eficiência energética é fundamental para garantir a autonomia de diversos dispositivos com uma bateria com capacidade de energia limitada. Para operar de forma mais eficiente, o amplificador tem a opção de operar próxima à região de saturação. Podemos utilizar a definição de eficiência de potência agregada (PAE)

$$P_{AE} = \frac{P_{out} - P_{in}}{P_{dc}} \quad (1)$$

Sendo P_{out} a potência de saída, P_{in} a potência de entrada que será amplificada e P_{DC} a potência fornecida como alimentação ao PA. Ocorre também uma dissipação de potência de alimentação na forma de calor, esta subtrai a potência de saída.

A máxima eficiência de um amplificador de potência é alcançada quando o dispositivo opera perto da região de saturação. Contudo, essa condição também marca o início da compressão de ganho, um fenômeno no qual o ganho do amplificador se torna dependente da amplitude do sinal de entrada, deixando de ser linear. Essa compressão, conforme mostra a Figura 2, é um indicativo da degradação da linearidade do sistema, e compromete a fidelidade do sinal amplificado. (RAZAVI, 1997)

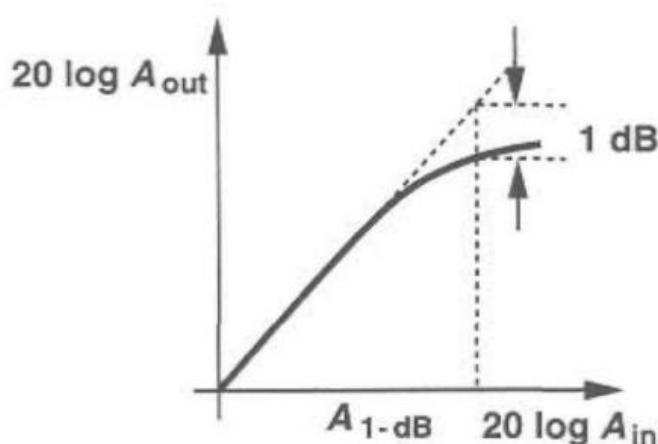


Figura 2 - Compressão de ganho – Fonte: (RAZAVI, 1997)

2.3 EFEITOS CAUSADOS PELA NÃO-LINEARIDADE

Discutiremos nesta seção alguns efeitos que causam a não-linearidade, entre eles tratamos da distorção harmônica total e do fenômeno da intermodulação.

A distorção harmônica total é definida como a razão entre os componentes de frequência harmônicos causados pela não linearidade do amplificador. Em geral, o valor da THD é obtido por meio da raiz quadrada da soma dos quadrados dos cinco ou seis primeiros harmônicos. No entanto, na prática, muitas vezes é suficiente considerar apenas o segundo e o terceiro harmônicos, já que os de ordem superior tendem a apresentar amplitudes muito menores.

É importante também examinar os produtos de distorção gerados pela aplicação de dois tons distintos em um sistema não linear. Quando dois sinais com frequências f_1 e f_2 são aplicados a um sistema com características não lineares, aparecem componentes adicionais conhecidos como produtos de intermodulação, estes que resultam de combinações de soma e diferença entre as frequências de entrada. Os produtos de segunda ordem, como f_1+f_2 e f_1-f_2 , geralmente aparecem afastados das frequências originais e podem ser removidos por filtragem, a depender da largura de banda do sistema. Contudo, em sistemas de banda larga, esses componentes podem permanecer dentro da faixa de interesse. Já os produtos de terceira ordem, como $2f_1+f_2$ ou $2f_2+f_1$, embora também possam ser filtrados, existem outros como $2f_1-f_2$ e $2f_2-f_1$ que surgem próximos às frequências originais. (ZUMBAHLEN, 2008)

Esses últimos são especialmente problemáticos, pois tornam-se difíceis de filtrar e são responsáveis por degradar a linearidade do sistema, afetando canais adjacentes e provocando interferência em comunicações multicanaís, como mostra a Figura 3.

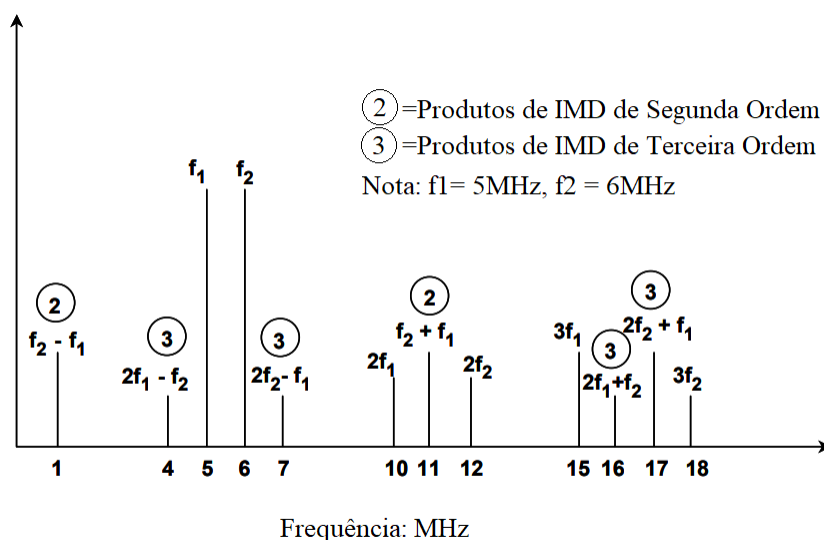


Figura 3 – Fenômeno de Intermodulação - Adaptado de: (ZUMBAHLEN, 2008)

2.4 ABORDAGENS EM RELAÇÃO AO MODELO

No contexto da análise e simulação de circuitos não lineares, como PAs em RF, os modelos matemáticos utilizados podem ser classificados em modelos físicos e modelos comportamentais (ou empíricos). Um modelo físico é aquele cuja formulação matemática deriva diretamente do conhecimento das características físicas do dispositivo. Apesar de sua alta precisão, esses modelos tendem a ser computacionalmente intensivos e complexos.

Por outro lado, a modelagem comportamental é uma abordagem empírica que visa descrever o comportamento do dispositivo com base em observações experimentais, ou seja, a partir de dados medidos, sem necessitar conhecer a física interna do dispositivo. Esses modelos são mais compactos, computacionalmente eficientes e fornecem informação qualitativa direta sobre o desempenho externo do circuito.

Além disso, os modelos empíricos podem ser subdivididos em locais, com precisão restrita a uma pequena faixa de operação, e globais, concebidos para ampla aplicabilidade, embora com menor exatidão local. A escolha de um modelo comportamental envolve a definição de um consenso entre uma faixa satisfatória de alcance, precisão e custo computacional. O que é conhecido como “modelo ótimo”. (PEDRO, 2003)

2.5 MODELAGEM COMPORTAMENTAL DE UM AMPLIFICADOR DE POTÊNCIA EQUIVALENTE PASSA-BAIXA

Quando um amplificador de potência opera em regime de compressão de ganho e próximo à saturação, ocorre a geração de distorções não lineares, incluindo componentes harmônicas e produtos de intermodulação próximos à frequência da portadora ω_c . Embora a rede de casamento de saída do PA seja projetada para atenuar significativamente as componentes harmônicas, os produtos de intermodulação não são eliminados e aparecem nas medições realizadas na saída do dispositivo.

Dessa forma, para representar com precisão o comportamento de um PA nessas condições, é necessário o uso de um modelo comportamental não linear que mapeie o sinal de saída como uma função não linear do sinal de entrada. Temos também que levar em conta efeitos dinâmicos que surgem devido a respostas não ideais de frequência. Tais efeitos impõem a necessidade de modelagem com memória, ou seja, o valor da saída em um dado instante deve depender não apenas da entrada atual, mas também de amostras passadas.

Nesse contexto, devemos fazer a escolha entre dois tipos de modelos comportamentais. O primeiro seria o modelo passa-faixa. Este modelo trabalha diretamente com os sinais modulados na frequência da portadora. O sinal de saída $y(n)$ é expresso como uma função não linear f_{BP} do sinal de entrada $x(n)$ e de suas amostras passadas, conforme:

$$y(n) = f_{BP}[x(n), x(n-1), \dots, x(n-M_{BP})] \quad (2)$$

M_{BP} é a profundidade de memória do modelo e o f_{BP} é um operador não linear que representa a relação funcional entre entrada e saída. Este tipo de modelagem oferece uma representação direta do comportamento do PA em frequência, sendo adequado para análises espectrais detalhadas. Ao amostrar uniformemente um sinal no tempo, seu conteúdo no domínio da frequência é replicado em múltiplos inteiros da frequência de amostragem. Neste caso, essas réplicas espectrais são amplamente separadas, facilitando a distinção entre componentes dentro da banda e fora da banda. No entanto, o uso desta modelagem demanda taxas de amostragem elevadas, da ordem de gigahertz, conforme é determinado pelo critério de Nyquist para evitarmos o aliasing, resultando em alto custo computacional.

No modelo passa-baixa equivalente, a abordagem é focada nos envoltórios complexos dos sinais, $\tilde{x}(n)$ e $\tilde{y}(n)$, reduzindo a largura de banda e, conseqüentemente, o custo computacional. A saída é modelada como:

$$\tilde{y}(n) = f_{LPE}[\tilde{x}(n), \tilde{x}(n-1), \dots, \tilde{x}(n-M_{LPE})] \quad (3)$$

Sendo M_{LPE} o número de amostras prévias como memória e f_{LPE} operador não linear do modelo passa baixa equivalente.

A principal vantagem do modelo equivalente passa-baixa é sua eficiência computacional, visto que trata apenas da largura de banda da envoltória (na ordem de MHz), logo a taxa de amostragem é de uma ordem de magnitude menor que o modelo passa-faixa. Por outro lado, a menor frequência de amostragem provoca a sobreposição das bandas fundamental e harmônicas ao redor da frequência zero. Isso dificulta a separação espectral entre componentes dentro da banda e fora da banda, tornando a análise espectral menos informativa.

Uma vez que as componentes fora da banda não são observadas na saída do PA (graças à filtragem pelas redes de casamento), a geração desses componentes por um modelo equivalente passa-baixa representa cálculos desnecessários, que podem comprometer a eficiência do modelo. Assim, um modelo passa-baixa eficiente deve ser projetado para gerar exclusivamente componentes dentro da banda, o que equivale a restringir a multiplicação da frequência da portadora ωC a um único fator inteiro fixo. (FREIRE, 2015)

2.6 GMDH

O Group Method of Data Handling (GMDH) é uma técnica de modelagem matemática e preditiva baseada em redes auto-organizáveis, originalmente proposta por Alexey Ivakhnenko na década de 1960.

O método opera com o mínimo de intervenção humana. E mesmo quando aplicado a problemas com grande número de variáveis de entrada, o método é capaz de fornecer resultados precisos.

A estrutura do modelo é organizada em camadas, cada uma contendo um determinado número de neurônios. Cada neurônio recebe sempre duas entradas. E

cada neurônio produz uma única saída, a qual é utilizada como entrada para a camada seguinte, conforme mostra a Figura 4. Uma camada sempre possui um neurônio a menos que a camada anterior.

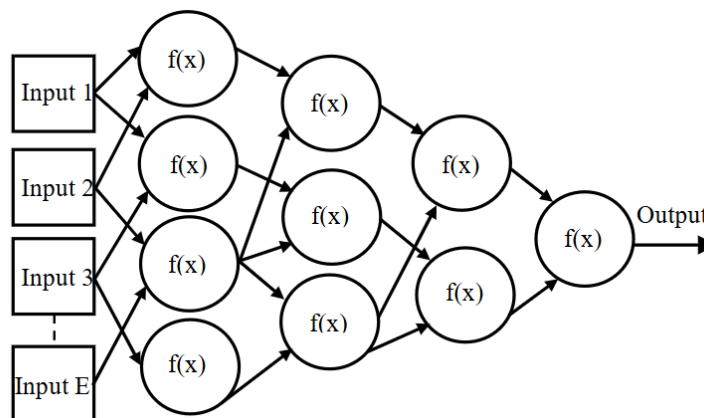


Figura 4 – Bloco de diagrama do GMDH – FONTE: (Machado, 2022)

O número de neurônios em cada camada do modelo GMDH é determinado pela quantidade de entradas reais. Da segunda camada até a última, essas entradas passam a ser constituídas pelas saídas reais dos neurônios da camada anterior. Um neurônio utiliza uma função de ativação definida por:

$$f(x) = m + nxi + oxj + pxixj + qxi^2 + rxj^2 \quad (4)$$

Em que os índices i e j representam, respectivamente, a primeira e a segunda entrada do neurônio. Os coeficientes m , n , o , p , q e r são ajustáveis e específicos para cada neurônio, influenciando diretamente sua saída e, consequentemente, o cálculo das ativações nas camadas subsequentes.

Os principais aspectos do método envolvem a definição da topologia da rede, como o número de camadas, o número de entradas, e a seleção dos neurônios mais adequados em cada camada, buscando as combinações mais adequadas para melhorar a precisão do modelo final. Além disso, para obter um controle mais eficaz da modelagem utilizando GMDH, são utilizados a identificação e o ajuste dos coeficientes da função de ativação.

É necessário adaptar a função de ativação utilizada em cada neurônio, ao aplicar o modelo GMDH para a modelagem comportamental de amplificadores de potência. Isso se deve ao fato de que os sinais envolvidos são de valores complexos, como a parte real e imaginária representando o sinal de envoltória. Essa adaptação visa aumentar a precisão da modelagem e, ao mesmo tempo, reduzir a complexidade computacional.

A função de ativação de um neurônio deve ser complexa, para que o neurônio seja capaz de processar entradas no domínio complexo. E também deve respeitar a condição de estar definida em um domínio complexo e limitado. Com base nisso, a função de ativação anterior é modificada para se adequar a esse contexto.

$$f(x) = mxi + nxj + oxi|x_i| + pxj|x_j| + qxi|x_j| + rxj|x_i| \quad (5)$$

Os índices i e j ainda se referem às posições das entradas, que agora são valores complexos. Na função de ativação adaptada, os coeficientes m , n , o , p , q e r permanecem como parâmetros ajustáveis, enquanto

O módulo do valor complexo ($|x|$), a partir do terceiro termo, passa a ser utilizado como um dos fatores nas multiplicações entre variáveis. Na equação (5), cada coeficiente ajustável é multiplicado por uma contribuição que contém uma entrada complexa. Isso é feito porque, na modelagem comportamental de amplificadores de potência em banda base complexa, apenas contribuições com paridade ímpar em relação à entrada complexa são relevantes para a banda base.

Como a entrada em si tem paridade ímpar, e o módulo tem paridade par com relação à entrada, o produto entre ambas mantém a paridade ímpar, o que preserva a utilidade da contribuição para a modelagem no domínio complexo.

O resultado final da rede neural, quando GMDH é aplicado a modelagem de amplificadores de potência, consiste em uma única saída, que depende da entrada aplicada no instante atual e também em instantes passados. (MACHADO, 2022)

2.7 MODELOS PARA MÚLTIPLOS MODOS DA LITERATURA

Para fins de comparação de desempenho, será utilizado como referência o método Decomposed Piecewise, que se baseia na segmentação da entrada por faixas de amplitude. Neste método, diferentes modelos são atribuídos a diferentes regiões.

A equação base para essa modelagem Decomposed Piecewise é ilustrado abaixo:

$$y(n) = \sum_{p=1}^P \sum_{m=0}^M \sum_{z=1}^Z h_{p,m,z} x_z(n-m) |x_z(n-m)|^{p-1} \quad (6)$$

$$|x_z(n)| = \begin{cases} 0, & \text{se } |x(n)| \leq l_z \\ |x(n)| - l_z, & \text{se } l_z < |x(n)| \leq l_z + 1 \\ l_z + 1 - l_z, & \text{se } |x(n)| > l_z + 1 \end{cases} \quad (7)$$

O método Decomposed Piecewise realiza a segmentação do sinal de entrada em Z regiões. Define-se que a amplitude do sinal deve estar compreendida no intervalo delimitado pelos limiares l_z e $l_z + 1$. Caso a amplitude da entrada seja inferior ao limite inferior, o valor atribuído àquela região é zero. Se, por outro lado, a amplitude excede $l_z + 1$, considera-se que o sinal está saturado, limitando sua influência ao valor máximo definido (SCHUARTZ, 2018).

Cada uma das regiões utiliza uma combinação de modelos distintas. Ainda assim, a construção da saída depende das regiões subsequentes, o que significa que a modelagem em uma determinada região é complementada pelas regiões subsequentes. Essa abordagem possibilita uma representação mais precisa do comportamento não linear do amplificador.

3. PROPOSTA

A proposta central deste trabalho é o desenvolvimento de um modelo comportamental para amplificadores de potência multimodos utilizando o método de auto-organização GMDH. O objetivo é avaliar a capacidade do GMDH em representar com precisão os efeitos não lineares e de memória associados a amplificadores

multimodos operando em diferentes regimes de ganho, preservando a simplicidade estrutural do modelo.

Para o modelo GMDH será utilizado uma modificação da Decomposed Piecewise: Tais modificações incluem a imposição de um limite superior de amplitude, a eliminação dos efeitos de saturação e atenuação, e a introdução de um parâmetro adicional para considerar o atraso na comutação entre modos de operação. Cada região z corresponde a um modo de ganho do PA é obtida da seguinte forma: (SCHUARTZ, 2018)

$$x_z(n) = \begin{cases} 0, & \text{se } |x(n-q)| \leq l_z \\ x(n), & \text{se } l_z < |x(n-q)| \leq l_z + 1 \\ 0, & \text{se } |x(n-q)| > l_z + 1 \end{cases} \quad (8)$$

Foi utilizado uma topologia com 3 neurônios na camada inicial, 2 neurônios na camada subsequente e 1 na camada final. Como estamos tratando de $z=3$, o número dessa topologia foi triplicado, tendo estes coeficientes ajustados para cada região, conforme mostra a Figura 5.

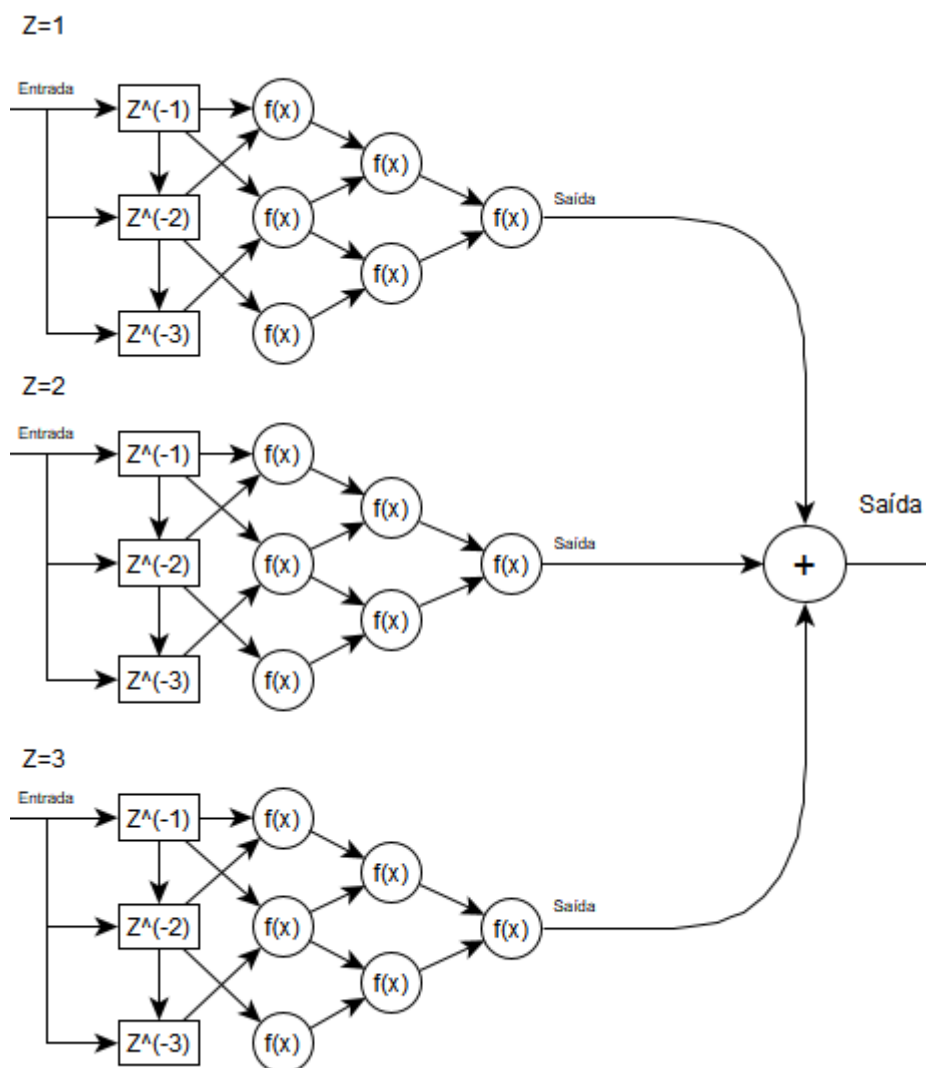


Figura 5 Topologia para o PA multimodo usando GMDH - Fonte: Autor (2025)

Ao comparar ambos os métodos com Decomposed Piecewise, ou seja, a versão polinomial da literatura e a versão GMDH proposta, espera-se analisar não apenas a precisão na predição do comportamento do PA, mas também o impacto em termos de complexidade computacional, número de parâmetros e viabilidade de implementação em sistemas de transmissão modernos.

4. METODOLOGIA

4.1 SOFTWARE UTILIZADO

As simulações dos modelos foram realizadas utilizando o software GNU Octave, uma ferramenta de código aberto amplamente utilizada para processamento numérico. A biblioteca de interesse utilizada foi a “optim”, este pacote voltado para a otimização numérica. Para o ajuste da curva, a função de interesse foi a lsqnonlin, esta que resolve problemas de mínimos quadrados não-lineares.

4.2 MÉTRICAS UTILIZADAS

Uma das métricas utilizadas na validação de modelos comportamentais de amplificadores de potência é o erro médio quadrático normalizado, definido por:

$$NMSE = 10 \log_{10} \left(\frac{\sum_{n=1}^N |e(n)|^2}{\sum_{n=1}^N |y_{ref}(n)|^2} \right) \quad (9)$$

onde $y_{ref}(n)$ representa o sinal de referência da envoltória complexa no instante de tempo n , e $e(n) = y_{ref}(n) - y_{est}(n)$ é o erro de modelagem, calculado como a diferença entre o sinal de referência $y_{ref}(n)$ e o sinal estimado $y_{est}(n)$ fornecido pelo modelo comportamental.

Na validação de modelos de PAs, o sinal de referência é aquele medido na saída real do amplificador, enquanto o sinal de teste é o resultado estimado gerado pelo modelo ao receber o mesmo sinal de entrada.

4.3 DADOS UTILIZADOS

Os dados do amplificador foram retirados de uma simulação feita no Cadence Virtuoso. Sendo um PA CMOS classe AB reconfigurável, recebeu um sinal LTE QPSK de banda de 10 MHz, com frequência de amostragem de 122,88 MHz e com frequência central em 2,4 GHz.

4.4 PARÂMETROS UTILIZADOS

Para o modelo de comparação, os parâmetros foram definidos com profundidade de memória $M=2$, ordem de polinômio $P=5$ e número de região $Z=3$. As regiões de operação são segmentadas por limiares de amplitude $l_1=0$, $l_2=0,015$, $l_3=0,03$ e $l_4=\infty$ (SCHUARTZ, 2018).

No caso da topologia GMDH, os limiares de amplitude são os mesmos para a comparação ser válida, e a topologia é da figura 5.

5. RESULTADOS

Com a realização desta simulação obtemos as Figuras de 6 a 13 mostradas na sequência.

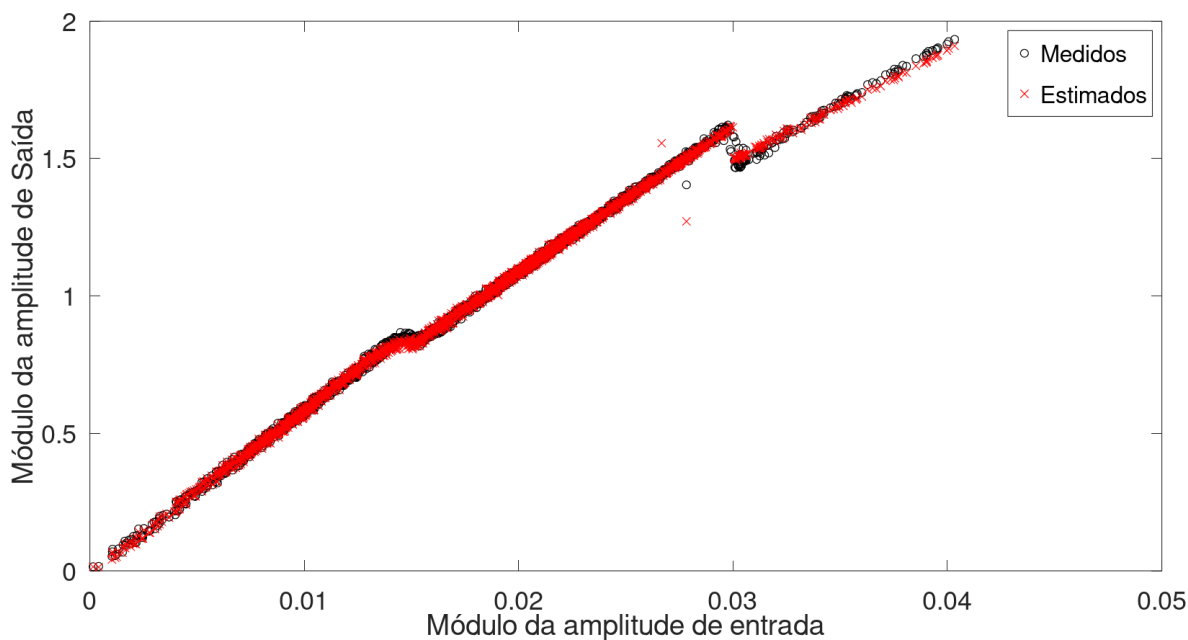


Figura 6 - Amplitude de saída em função da amplitude de entrada usando o MP - Fonte: Autor (2025)

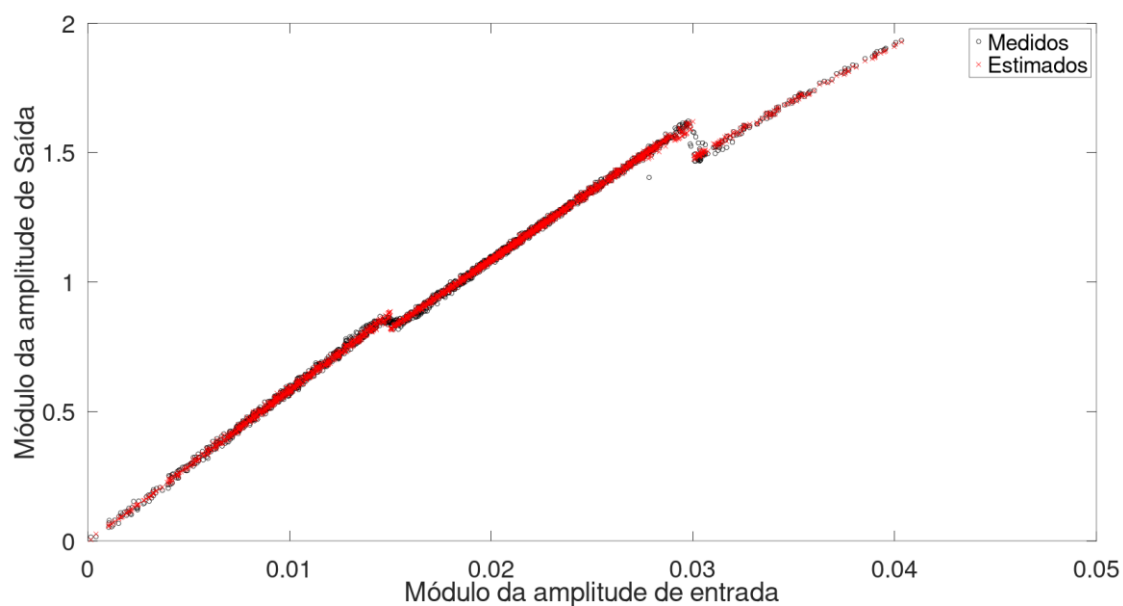


Figura 7 - Amplitude de saída em função da amplitude de entrada usando o GMDH - Fonte: Autor (2025)

Para os gráficos de AM/AM (Figura 6 e 7), temos a amplitude de saída pela amplitude de entrada. Percebemos que os modelos mantêm uma certa fidelidade ao que foi amostrado como saída. Podemos perceber as descontinuidades para os limiares que foram escolhidos, em que cada região tem coeficientes diferentes para melhor ajuste à curva medida.

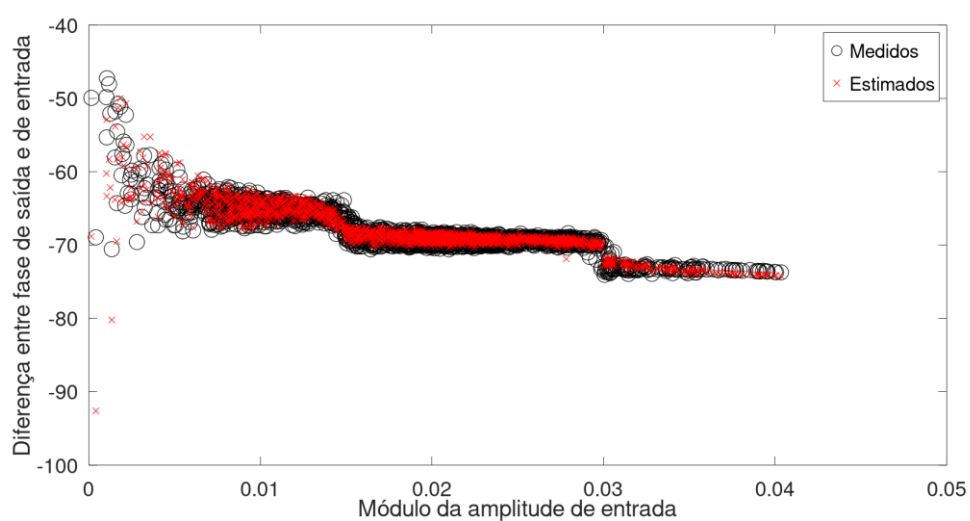


Figura 8 – Diferença entre fase de saída e de entrada em função da amplitude de entrada usando o MP – Fonte: Autor (2025)

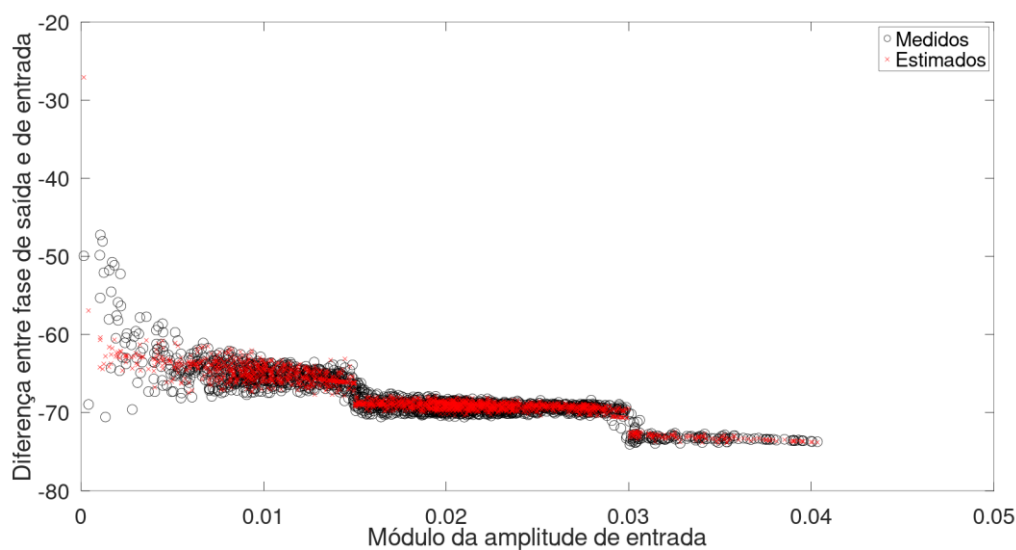


Figura 9 Diferença entre fase de saída e de entrada em função da amplitude de entrada usando o GMDH –
Fonte: Autor (2025)

Para estes gráficos AM-PM (Figuras 8 e 9), temos a representação da variação de fase em função da amplitude de entrada. Em baixas amplitudes, temos uma dispersão maior da variação de fase, mas com o aumento da amplitude a variação se reduz e os modelos conseguem ser precisos.

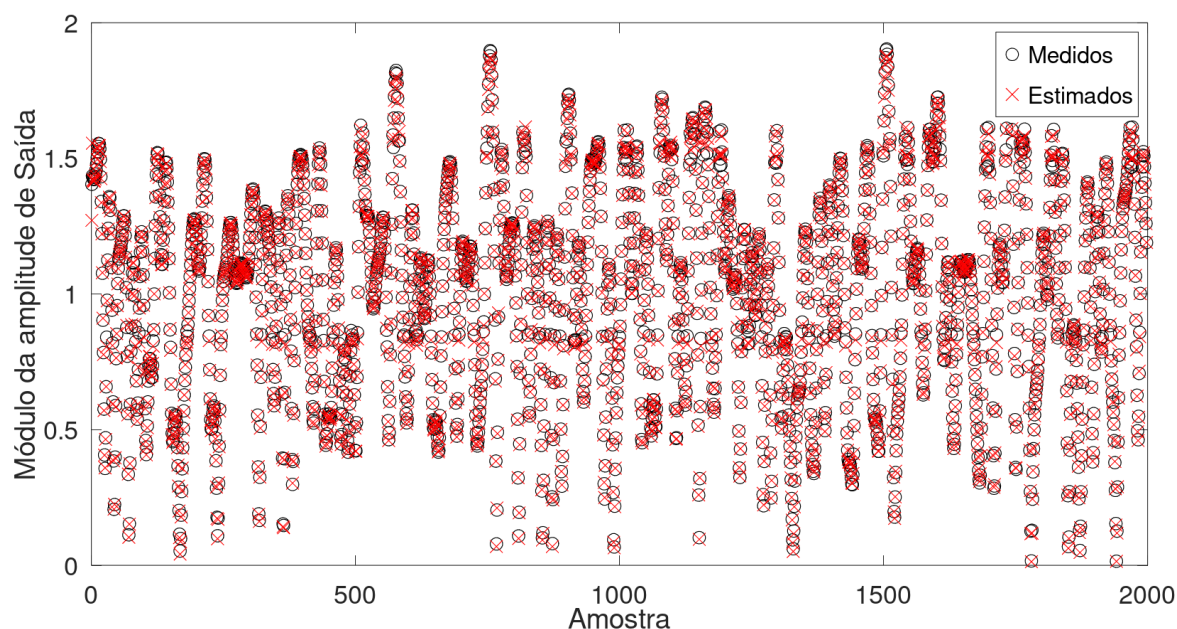


Figura 10 - Amplitude de saída por amostra usando o MP - Fonte: Autor (2025)

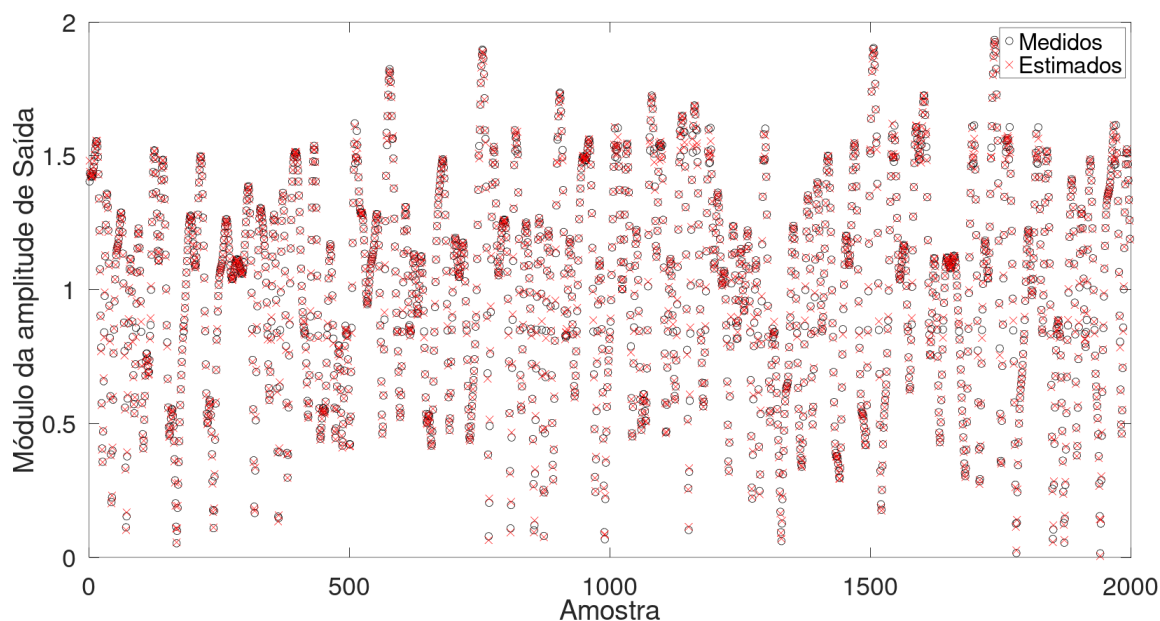


Figura 11 - Amplitude de saída por amostra usando o GMDH - Fonte: Autor (2025)

Nas Figuras 10 e 11 temos gráficos para verificar a precisão da amplitude para as amostras no tempo. Verificamos que as amostras estimadas acompanham a curva das amostras medidas, há uma fidelidade mesmo com a rápida variação no valor da amplitude.

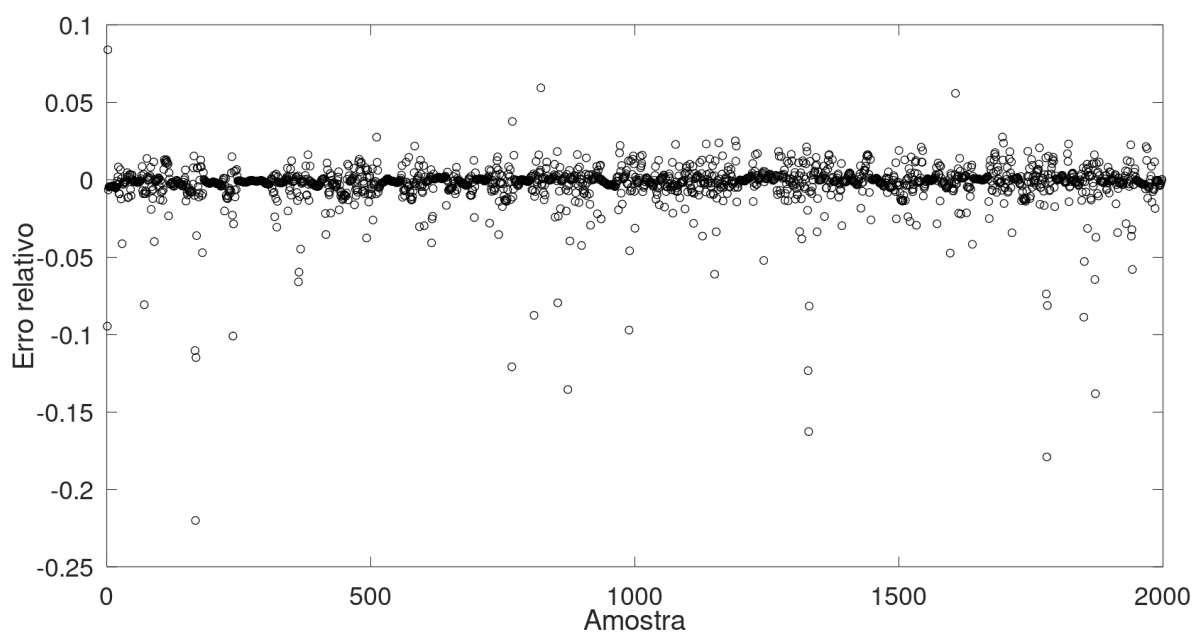


Figura 12 - Erro relativo para cada amostra usando o MP - Fonte: Autor (2025)

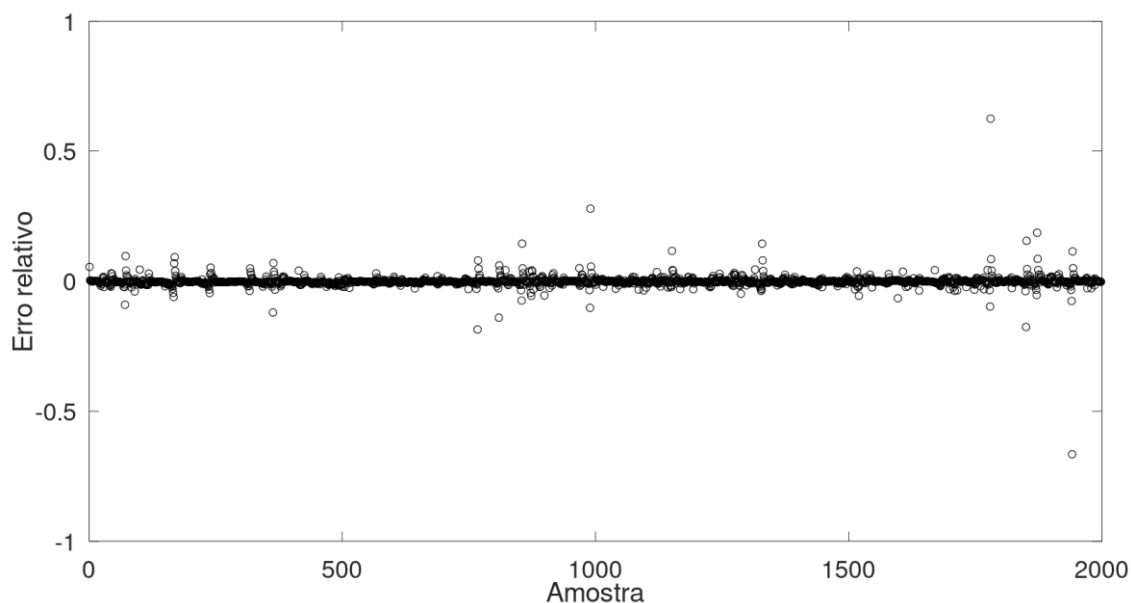


Figura 13 - Erro relativo para cada amostra usando o GMDH - Fonte: Autor (2025)

Nas figuras 12 e 13 temos o erro relativo de cada amostra. Temos apenas algumas amostras como pontos totalmente fora da curva, enquanto a maioria está próxima de 0.

Tabela 1 - Comparação entre os métodos de modelagem

Método	Número de coeficientes	NMSE (dB)
Decomposed Piecewise	45	-38,916
GMDH (3 camadas)	108	-39,047

Fonte: O autor

Para o desempenho em termos de erro médio quadrático normalizado, obtemos resultados próximos nos modelos, conforme mostra a Tabela 1, obtemos resultados próximos nos modelos. O GMDH obteve um resultado melhor, porém essa melhora no desempenho custa um aumento significativo de coeficientes.

6. CONCLUSÃO

Neste trabalho, buscamos estender o modelo GMDH para que seja possível utilizá-lo de forma precisa em PAs multimodos, para verificar esse desempenho fizemos uma comparação com método da literatura que é muito utilizado neste campo, o Decomposed Piecewise. Os dados utilizados foram fornecidos de simulações do Cadence Virtuoso e o software utilizado para a geração dos coeficientes foi o OCTAVE.

Concluimos que apesar de ter uma redução do erro, o GMDH gerou um número muito maior de coeficientes em relação ao modelo comparado. Essa pequena melhoria na precisão pode ser justificada pela fixação de uma única topologia, com quantidades de neurônios fixos e escolha não ótima de quais entradas aplicar para cada neurônio. Fica como sugestões futuras a verificação de eventuais melhorias na precisão da modelagem ao utilizar-se quantidades diferentes de neurônios com escolha ótima de quais entradas aplicar para cada neurônio, bem como a aplicação de GMDH para gerar o pré-distorcedor digital.

7. REFERÊNCIAS

FREIRE, L. B. C.; FRANÇA, C.; LIMA, E. G. A Modified Real-Valued Feed-Forward Neural Network Low-Pass Equivalent Behavioral Model for RF Power Amplifiers. **Progress In Electromagnetics Research C**, Vol. 57, 43-52, 2015

MACHADO, A. P. P.; NYPWIPWY, V. B.; FRANÇA, C.; LIMA, E. G. Selective Algorithm for Expanded Group Method of Data Handling Applied to Power Amplifier Modeling. **Journal of Integrated Circuits and Systems**, v. 17, n. 2, p. 1–8, 17 set. 2022.

PEDRO, J.C.; CARVALHO, N.B. **Intermodulation Distortion in Microwave and Wireless Circuits**. Norwood, Boston. Artech House, 2003. ISBN 1-58053-356-6

RAZAVI, Behzad. **RF Microelectronics**. 1. ed. Upper saddle river, New Jersey: Prentice Hall, 1997. ISBN 978-0138875718.

SCHUARTZ, L. **Linearização de amplificadores de Amplificadores de potência com controle de ganho discreto**. 2018. Dissertação. (Mestrado) Universidade Federal do Paraná, Paraná, 2018.

SINHA, S. State of IoT 2024: Number of connected IoT devices growing 13% to 18.8 billion globally. **IoT Analytics**, 2025. Disponível em: <<https://iot-analytics.com/number-connected-iot-devices/>>. Acesso em: 20 de junho de 2025

THANGASAMY, V.; KAMSANI, N.A.; HAMIDON, M.N.; BUKHORI, M.F. An overview of RF power amplifier techniques and effect of transistor scaling on its design parameters. **International Journal of Applied Engineering Research**, v. 9, n. 2, p. 257–276, 1 jan. 2014.

ZUMBAHLEN, H; **Linear circuit design handbook**. [s.l.] Newnes, 2008.