

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

MARCIO NASSIF MALUF

MODELAGEM COMPORTAMENTAL DE AMPLIFICADORES DE
POTÊNCIA DE RADIOFREQUÊNCIA USANDO SÉRIE DE VOLTERRA
COM DIMENSÃO REDUZIDA E TRUNCAMENTOS INDEPENDENTES

CURITIBA

2018

MARCIO NASSIF MALUF

MODELAGEM COMPORTAMENTAL DE AMPLIFICADORES DE
POTÊNCIA DE RADIOFREQUÊNCIA USANDO SÉRIE DE VOLTERRA
COM DIMENSÃO REDUZIDA E TRUNCAMENTOS INDEPENDENTES

Dissertação apresentada ao curso de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Eduardo Gonçalves de Lima

CURITIBA

2018

Catálogo na Fonte: Sistema de Bibliotecas, UFPR
Biblioteca de Ciência e Tecnologia

M261m Maluf, Marcio Nassif

Modelagem comportamental de amplificadores de radiofrequência usando série de volterra com dimensão reduzida e truncamentos independentes [recurso eletrônico] / Marcio Nassif Maluf – Curitiba, 2018.

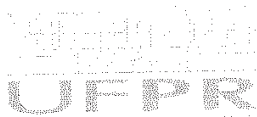
Dissertação (mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Setor de Tecnologia da Universidade Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Eduardo Gonçalves de Lima

1. Amplificadores de potencia. 2. Engenharia elétrica. I. Universidade Federal do Paraná. II. Lima, Eduardo Gonçalves de. III. Título.

CDD 621.044

Bibliotecária: Vilma Machado CRB9/1563



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SETOR TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO ENGENHARIA
ELÉTRICA

TERMO DE APROVAÇÃO

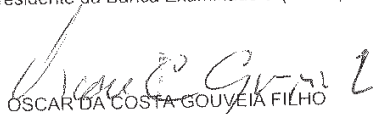
Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em ENGENHARIA ELÉTRICA da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da Dissertação de Mestrado de **MARCIO NASSIF MALUF** intitulada: **Modelagem comportamental de amplificadores de potência de radiofrequência usando série de Volterra com dimensão reduzida e truncamentos independentes**, após terem inquirido o aluno e realizado a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa.

A outorga do título de mestre está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

Curitiba, 28 de Novembro de 2018.


EDUARDO GONÇALVES DE LIMA

Presidente da Banca Examinadora (UFPR)


OSCAR DA COSTA GOUVEIA FILHO

Avaliador Interno (UFPR)


OHARA KERUSAUSKAS RAYEL

Avaliador Externo (UFPR)


LUIS HENRIQUE ASSUMPÇÃO LOLIS

Avaliador Interno (UFPR)

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço ao Criador do Universo, pois se não fosse por Ele, nada seria possível.

Aos meus pais, Cyro e Wilma, por nunca duvidarem de minha capacidade, e sempre deram o apoio que precisei em todas as etapas da minha vida.

Aos meus filhos, Aline e Daniel, que estiveram ao meu lado, dando todo incentivo possível e compreendendo que por muitos momentos abdiquei de suas companhias para me dedicar a esse desafio.

A todos os professores do Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Paraná, em especial do GICS, pela transferência de conhecimentos, dedicação e paciência.

Agradeço ao CAPES pelo auxílio financeiro que muito colaborou em minha participação no MOMAG 2018 - 13º CBMag -Congresso Brasileiro de Eletromagnetismo e 18º SBMO – Simpósio Brasileiro de Micro-ondas e Optoeletrônica”, realizado no Instituto Nacional de Telecomunicações (Inatel) em Santa Rita do Sapucaí-MG de 12 a 15 de Agosto de 2018.

Aos colegas do GICS pela troca de experiências e pela companhia.

Um especial agradecimento a meu orientador, Prof. Dr. Eduardo Gonçalves de Lima, pela capacidade em transmitir conhecimento, pela paciência em orientar e disponibilidade para ensinar.

RESUMO

Este trabalho trata da modelagem comportamental de amplificadores de potência de radiofrequência (APRFs) utilizando séries de Volterra com dimensão reduzida. A complexidade computacional é reduzida com a utilização de modelos passa-baixas. Neste trabalho são apresentados três novos modelos comportamentais. O primeiro é um modelo comportamental com termos unidimensionais, onde as funções das entradas utilizam um único instante de tempo, e termos bidimensionais, onde as funções das entradas utilizam dois instantes de tempo diferentes, com truncamentos de ordem polinomial e duração de memória independentes. O segundo modelo comportamental, além dos termos unidimensionais e bidimensionais, inclui termos tridimensionais, onde as funções das entradas utilizam três instantes de tempo diferentes, com truncamentos de ordem polinomial e duração de memória iguais, permitindo obter todas as contribuições unidimensionais, bidimensionais e tridimensionais. O terceiro modelo comportamental estende o segundo modelo fazendo os truncamentos de ordem polinomial e duração de memória independentes. Os modelos foram validados utilizando dois conjuntos de dados. Um conjunto de dados foi medido em um APRF fabricado em tecnologia nitreto de gálio (GaN), com transistor HEMT operando em classe AB. O segundo conjunto de dados foi obtido de um modelo de circuito de um APRF na arquitetura Doherty, com transistores HEMT e adequado para fabricação na tecnologia GaN através de simulações de envoltória realizadas no simulador *Advanced Design System (ADS)* da Keysight Technologies. Os modelos propostos foram comparados com o modelo anterior que utilizou termos unidimensionais e bidimensionais da série de Volterra, com a mesma ordem polinomial e mesma duração de memória para os termos unidimensionais e bidimensionais. Foi possível verificar que os novos modelos reduziram o erro quadrático médio normalizado (NMSE) para uma mesma quantidade de coeficientes, bem como foi obtida uma redução no número de coeficientes para um mesmo NMSE.

Palavras-Chave: Amplificador de potência. Eficiência. Linearidade. Modelagem. Série de Volterra. Sistemas de comunicação sem fio.

ABSTRACT

This work deals with the behavioral modeling of radio frequency power amplifiers (RFPAs) using Volterra series with reduced size. The computational complexity is reduced with the use of low-pass models. In this work three new behavioral models are presented. The first one is a behavioral model with one-dimensional terms, where the input functions use a single time instant, and two-dimensional terms, where input functions use two different time instants, with independent polynomial order truncations and memory durations. The second behavioral model, besides the one-dimensional and two-dimensional terms, includes three-dimensional terms, where the input functions use three different time instants, with equal polynomial order truncations and memory durations, allowing to obtain all one-dimensional, two-dimensional and three-dimensional contributions. The third behavioral model extends the second model by making independent polynomial order truncations and memory duration. The models were validated using two sets of data. A data set was measured on a RFPA made of gallium nitride (GaN) technology, with HEMT transistor operating in class AB. The second data set was obtained from a RFPA circuit model in the Doherty architecture, with HEMT transistors and suitable for fabrication in the GaN technology through circuit-level simulations carried out in Keysight Technologies' Advanced Design System (ADS) simulator. The proposed models were compared with the previous model that used unidimensional and bidimensional terms of the Volterra series, with the same polynomial order and same memory duration for the one-dimensional and two-dimensional terms. It was possible to verify that the new models reduced the normalized mean square error (NMSE) for the same number of coefficients, as well as a reduction in the number of coefficients for the same NMSE.

Key words: Efficiency. Linearity. Modeling. Power amplifier. Volterra series.
Wireless communication systems.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – CARACTERÍSTICA DE TRANSFERÊNCIA: a) DPD b) APRF c) DPD+APRF.....	15
FIGURA 2 - AMPLIFICADOR DE POTÊNCIA - DIAGRAMA DE POTÊNCIAS ..	19
FIGURA 3 - DESEMPENHO TÍPICO DE UM APRF	21
FIGURA 4 - DIAGRAMA PARA MODELAGEM COMPORTAMENTAL DE UM APRF -EXTRAÇÃO.....	22
FIGURA 5 - DIAGRAMA PARA MODELAGEM COMPORTAMENTAL DE UM APRF -VALIDAÇÃO	22
FIGURA 6 - SINAL DE RF MODULADO EM AMPLITUDE E FASE.....	23
FIGURA 7 - SINAIS DE ENTRADA E SAÍDA DO APRF	24
FIGURA 8 - ESPECTRO DOS SINAIS DE RF NO APRF: (a) ENTRADA (b) SAÍDA	24
FIGURA 9 - DISTORÇÕES HARMÔNICAS NA SAÍDA PARA UM APRF EXCITADO POR UM TOM NA ENTRADA	25
FIGURA 10 - EFEITOS DE INTERMODULAÇÃO CAUSADOS POR OPERAÇÃO NÃO LINEAR DO APRF QUANDO SUJEITO À ENTRADA COM DOIS TONS	25
FIGURA 11 - ESPECTRO DO SINAL DE SAÍDA PARA UM SINAL DE DOIS TONS.....	27
FIGURA 12 - SINAL DE ENTRADA A UM TOM DEFINIDO POR (3): (a) SINAL DE.....	29
FIGURA 13 - (a) SINAL DE RF DEFINIDO POR (13) (b) ENVOLTÓRIA COMPLEXA	29
FIGURA 14 - COMPARAÇÃO DO NMSE EM FUNÇÃO DO NÚMERO DE	47
FIGURA 15 - COMPARAÇÃO DO NMSE EM FUNÇÃO DO NÚMERO DE COEFICIENTES PARA MODELOS EXISTENTES NA LITERATURA.....	48
FIGURA 16 - NMSE EM FUNÇÃO DO NÚMERO DE COEFICIENTES PARA VALORES MÁXIMOS DE TRUNCAMENTOS $P_{max}= 3$ E $M_{max}= 5$, $P_{max}= 5$ E $M_{max}= 3$ UTILIZANDO O MODELO 2D (20) [10] ..	50

FIGURA 17 - NMSE EM FUNÇÃO DO NÚMERO DE COEFICIENTES PARA VALORES MÁXIMOS DE TRUNCAMENTOS $P_{max.} = 3$ E $M_{max.} = 10$, $P_{max.} = 10$ E $M_{max.} = 3$ UTILIZANDO O MODELO 2D (20) [10].....	51
FIGURA 18 - NMSE EM FUNÇÃO DO NÚMERO DE COEFICIENTES PARA VALORES MÁXIMOS DE TRUNCAMENTOS $P_{max.} = 3$ E $M_{max.} = 5$, $P_{max.} = 5$ E $M_{max.} = 3$ UTILIZANDO O MODELO 3D (23)	52
FIGURA 19 - NMSE EM FUNÇÃO DO NÚMERO DE COEFICIENTES PARA VALORES MÁXIMOS DE TRUNCAMENTOS $P_{max.} = 3$ E $M_{max.} = 10$, $P_{max.} = 10$ E $M_{max.} = 3$ UTILIZANDO O MODELO 3D (23) .	52
FIGURA 20 - NMSE EM FUNÇÃO DO NÚMERO DE COEFICIENTES PARA OS MODELOS 2D COMPLETO (20) [10] E 3D COMPLETO (23)..	54
FIGURA 21 - NMSE EM FUNÇÃO DO NÚMERO DE COEFICIENTES PARA OS MODELOS 3D COMPLETO (23) E 3D COM TRUNCAMENTOS ESPECÍFICOS (25).....	55
FIGURA 22 - NMSE EM FUNÇÃO DO NÚMERO DE COEFICIENTES PARA OS MODELOS 2D COMPLETO, 2D E 3D PROPOSTOS	56
FIGURA 23 - NMSE EM FUNÇÃO DO NÚMERO DE COEFICIENTES SEM RESTRIÇÕES NOS TRUNCAMENTOS DO MODELO 3D	59
FIGURA 24 - COMPARAÇÃO ENTRE OS MODELOS 2D (20), 2D (24) E SEM RESTRIÇÕES NOS TRUNCAMENTOS PARA O MODELO 3D (25) – PONTOS A, A', A" DA TABELA 11	60
FIGURA 25 - COMPARAÇÃO ENTRE OS MODELOS 2D (20), 2D (24) E SEM RESTRIÇÕES NOS TRUNCAMENTOS PARA O MODELO 3D (25) – PONTOS B, B', B" DA TABELA 11	61
FIGURA 26 - COMPARAÇÃO ENTRE OS MODELOS 2D (20), 2D (24) E SEM RESTRIÇÕES NOS TRUNCAMENTOS PARA O MODELO 3D (25) – PONTOS C, C', C" DA TABELA 11	61
FIGURA 27 - COMPARAÇÃO ENTRE OS MODELOS 2D (20), 2D (24) E SEM RESTRIÇÕES NOS TRUNCAMENTOS PARA O MODELO 3D (25) – PONTOS D, D" DA TABELA 11	62
FIGURA 28 - COMPARAÇÃO ENTRE OS MODELOS 2D (20), 2D (24) E SEM	

RESTRIÇÕES NOS TRUNCAMENTOS PARA O MODELO 3D (25) – PONTOS E, E', E" DA TABELA 12	63
FIGURA 29 - COMPARAÇÃO ENTRE OS MODELOS 2D (20), 2D (24) E SEM RESTRIÇÕES NOS TRUNCAMENTOS PARA O MODELO 3D (25) – PONTOS F', F" DA TABELA 12	64
FIGURA 30 - COMPARAÇÃO ENTRE OS MODELOS 2D (20), 2D (24) E SEM RESTRIÇÕES NOS TRUNCAMENTOS PARA O MODELO 3D (25) – PONTOS G', G" DA TABELA 12	64
FIGURA 31 - COMPARAÇÃO ENTRE OS MODELOS 2D (20) E SEM RESTRIÇÕES	66
FIGURA 32 - COMPARAÇÃO ENTRE OS MODELOS 2D (20) E SEM RESTRIÇÕES NOS TRUNCAMENTOS PARA OS MODELOS 2D (24) E 3D (25) – PONTOS B, B' DA TABELA 13	66
FIGURA 33 - COMPARAÇÃO ENTRE OS MODELOS 2D (20) E SEM RESTRIÇÕES NOS TRUNCAMENTOS PARA OS MODELOS 2D (24) E 3D (25) – PONTOS C, C' DA TABELA 13	67
FIGURA 34 - CONVERSÃO AM-AM PARA DADOS MEDIDOS E ESTIMADOS POR (20), (24) e (25) COM 30 COEFICIENTES	68
FIGURA 35 - CONVERSÃO AM-PM PARA DADOS MEDIDOS E ESTIMADOS POR (20), (24) E (25) COM 30 COEFICIENTES	69
FIGURA 36 - ERRO NA AMPLITUDE DE SAÍDA ESTIMADO POR (20), (24) E (25) COM 30 COEFICIENTES	70
FIGURA 37 - ERRO NA DIFERENÇA DE FASE ESTIMADO POR (20), (24) E (25)	71
FIGURA 38 - NMSE EM FUNÇÃO DO NÚMERO DE COEFICIENTES PARA VALORES MÁXIMOS DE TRUNCAMENTOS $P_{max.} = 5$ E $M_{max.} =$ 3 , $P_{max.} = 3$ E $M_{max.} = 5$ UTILIZANDO O MODELO 2D (20) [10]	73
FIGURA 39 - NMSE EM FUNÇÃO DO NÚMERO DE COEFICIENTES PARA VALORES MÁXIMOS DE TRUNCAM	73
FIGURA 40 - NMSE EM FUNÇÃO DO NÚMERO DE COEFICIENTES PARA VALORES MÁXIMOS DE TRUNCAMENTOS $P_{max.} = 3$ E $M_{max.} =$ 5 , $P_{max.} = 5$ E $M_{max.} = 3$ UTILIZANDO O MODELO 3D (23)	74
FIGURA 41 - NMSE EM FUNÇÃO DO NÚMERO DE COEFICIENTES PARA	

VALORES MÁXIMOS DE TRUNCAMENTOS $P_{max.} = 3$ E $M_{max.} = 10$, $P_{max.} = 10$ E $M_{max.} = 3$ UTILIZANDO O MODELO 3D (23) .	75
FIGURA 42 - COMPARAÇÃO ENTRE OS MODELOS 2D (20), 2D (24) E 3D (25) PONTOS A, A', A" DA TABELA 16	76
FIGURA 43 - COMPARAÇÃO ENTRE OS MODELOS 2D (20), 2D (24) E 3D (25) – PONTOS A, A', A" DA TABELA 17	77
FIGURA 44 - COMPARAÇÃO ENTRE OS MODELOS 2D (20), 2D (24) E 3D (25)	78
FIGURA 45 - CONVERSÃO AM-AM PARA DADOS MEDIDOS E ESTIMADOS POR (20), (24) E (25) COM 48 COEFICIENTES.....	79
FIGURA 46 - CONVERSÃO AM-PM PARA DADOS MEDIDOS E ESTIMADOS POR (20), (24) E (25) COM 48 COEFICIENTES.....	80
FIGURA 47 - ERRO NA AMPLITUDE DE SAÍDA ESTIMADO POR (20), (24) E (25) COM 30 COEFICIENTES	81
FIGURA 48 - ERRO NA DIFERENÇA DE FASE ESTIMADO POR (20), (24) E (25) COM 30 COEFICIENTES	82

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 -	NÚMERO DE COEFICIENTES GERADOS EM (20).....	38
Tabela 2 -	NÚMERO DE COEFICIENTES GERADOS EM (23).....	39
Tabela 3 -	NÚMERO DE COEFICIENTES GERADOS EM (24).....	40
Tabela 4 -	COMPARAÇÃO ENTRE COEFICIENTES GERADOS EM (20) E (24).	41
Tabela 5 -	NÚMERO DE COEFICIENTES GERADOS EM (25).....	43
Tabela 6 -	COMPARAÇÃO ENTRE COEFICIENTES GERADOS EM (23) E (25).	44
Tabela 7 -	ESCOLHA DOS TRUNCAMENTOS PARA OS MODELOS 2D..	49
Tabela 8 -	ESCOLHA DOS TRUNCAMENTOS PARA OS MODELOS 3D..	49
Tabela 9 -	COMPARAÇÃO ENTRE OS MELHORES NMSEs EM (24) E (25).	57
Tabela 10 -	COMPARAÇÃO ENTRE OS NMSEs OBTIDOS EM (24) E (25).	58
Tabela 11 -	COMPARAÇÃO ENTRE OS NMSEs OBTIDOS POR (24) E (25) PARA O MESMO NÚMERO DE COEFICIENTES.	60
Tabela 12 -	COMPARAÇÃO ENTRE OS NÚMEROS DE COEFICIENTES PARA O MESMO NMSE OBTIDOS POR (24) E (25).....	63
Tabela 13 -	COMPARAÇÃO ENTRE OS NMSEs OBTIDOS POR (24) E (25) PARA O MESMO NÚMERO DE COEFICIENTES.	65
Tabela 14 -	ESCOLHA DOS TRUNCAMENTOS PARA OS MODELOS 2D..	72
Tabela 15 -	ESCOLHA DOS TRUNCAMENTOS PARA OS MODELOS 3D..	72
Tabela 16 -	COMPARAÇÃO ENTRE OS NMSEs OBTIDOS POR (20), (24) E (25) PARA O MESMO NÚMERO DE COEFICIENTES.	76
Tabela 17 -	COMPARAÇÃO ENTRE OS NÚMEROS DE COEFICIENTES PARA O MESMO NMSE OBTIDOS POR (20), (24) E (25).	77
Tabela 18 -	COMPARAÇÃO ENTRE OS MELHORES NMSEs EM (20), (24) E (25).	78

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AM-AM	- Modulação em Amplitude para Modulação em Amplitude
AM-PM	- Modulação em Amplitude para Modulação em Fase
APRF	- Amplificador de Potência de Radiofrequência
CC	- Corrente Contínua
dB	- decibel
DPD	- Pré-distorção Digital
GaN	- Nitreto de Gálio
HEMT	- <i>High-Electron-Mobility Transistor</i>
LTE	- Evolução de Longo Prazo (4G)
MATLAB	- <i>MATRIX LABORATORY</i>
NMSE	- Erro Quadrático Médio Normalizado
OFDMA	- Multiplexação por Divisão de Frequências Ortogonais
RMS	- Valor Real Quadrático Médio
WCDMA	- Acesso Múltiplo por Divisão de Código em Sequência Direta
3GPP	- <i>3th Generation Partnership Project</i>

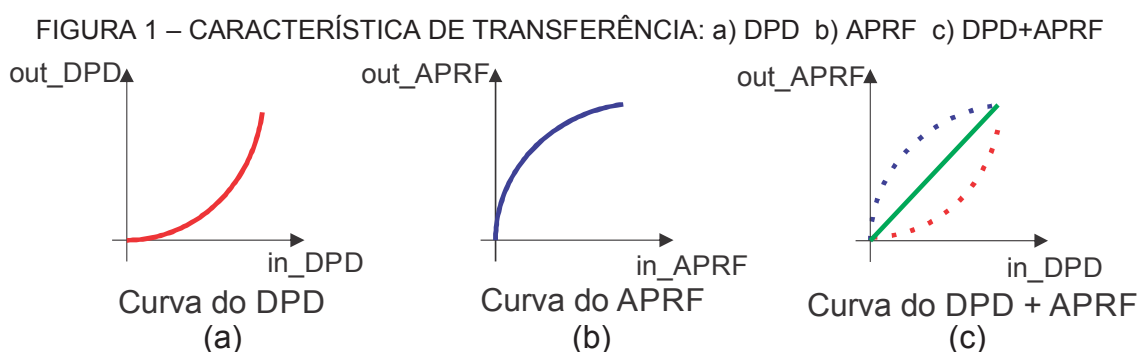
SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	OBJETIVOS	17
1.1.1	Objetivo Geral	17
1.1.2	Objetivos Específicos	18
1.2	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	18
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	19
2.1	APRF: EFICIÊNCIA E LINEARIDADE	19
2.2	MODELAGEM COMPORTAMENTAL DE APRF	21
2.3	SÉRIES DE VOLTERRA NA MODELAGEM COMPORTAMENTAL.....	30
2.3.1	Série Completa de Volterra	30
2.5	MÉTRICAS PARA VALIDAÇÃO	36
2.5.1	Erro Quadrático Médio Normalizado (NMSE)	36
3	NOVAS ABORDAGENS PARA MODELAGEM COMPORTAMENTAL DE APRFs	37
3.1	MODELO TRIDIMENSIONAL COM TRUNCAMENTOS IGUAIS.....	37
3.2	MODELO BIDIMENSIONAL COM TRUNCAMENTOS ESPECÍFICOS .	39
3.3	MODELO TRIDIMENSIONAL COM TRUNCAMENTOS ESPECÍFICOS	41
4	VALIDAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	45
4.1	DESCRIÇÃO DO CENÁRIO PARA VALIDAÇÃO	45
4.2	COMPARAÇÃO DE MODELOS COMPORTAMENTAIS DA LITERATURA.....	46
4.3	RESULTADOS PARA O APRF GAN HEMT CLASSE AB	48
4.3.1	Definição dos Truncamentos de Ordem Polinomial e Duração de Memória.	48
4.3.2	Resultados para os Modelos Bidimensional Completo e Tridimensional Completo com Restrições nos Truncamentos.	53
4.3.3	Resultados para os Modelos Tridimensional Completo e Tridimensional com Truncamentos Específicos e Restrições nos Truncamentos.	54
4.3.4	Resultados para o Modelo Anterior e Propostos 2D e 3D com Restrições nos Truncamentos.....	55
4.3.5	Resultados para o Modelo Anterior e Modelos Propostos 2D com Restrições e 3D sem Restrições nos Truncamentos.	58

4.3.6	Resultados para o Modelo Proposto 2D sem Restrições nos Truncamentos.	65
4.3.7	Características de Transferência para o Modelo Anterior e Modelos Propostos 2D e 3D.	67
4.4	RESULTADOS PARA O APRF GAN HEMT DOHERTY	71
4.4.1	Definição dos Truncamentos de Ordem Polinomial e Duração de Memória.	71
4.4.2	Resultados para os Modelos Anterior e Propostos 2D e 3D com Restrições nos Truncamentos.	75
4.4.3	Características de Transferência para o Modelo Anterior e Modelos Propostos 2D e 3D.	79
5	CONCLUSÃO	83
	REFERÊNCIAS	86

1 INTRODUÇÃO

A busca por maior eficiência energética em sistemas de comunicações sem fio torna-se cada vez mais importante dado o crescente aumento no número de usuários desses sistemas [1]-[2]. Aumentar a eficiência contribui para o aumento da autonomia da bateria presente nos dispositivos móveis e para a redução dos custos de dissipação de calor e consumo de energia nas estações de rádio-base. No sistema de comunicação sem fio, o elemento que mais consome energia é o amplificador de potência de radiofrequência (APRF) presente na cadeia de transmissão [3]. Contudo, quando o APRF opera na sua região de maior eficiência, não linearidades são observadas devido à compressão do ganho de potência [4]. A FIGURA 1b representa a característica não linear do APRF. Estas não linearidades precisam ser compensadas para evitar a interferência entre usuários alocados em canais adjacentes [3]. Nesse contexto, é possível desenvolver um pré-distorcedor digital (DPD) com características inversas ao APRF [5]. Esta técnica, chamada de pré-distorção digital tem como objetivo distorcer propositalmente o sinal de entrada de tal forma que a não linearidade do APRF seja compensada [5]. A FIGURA 1a representa a curva com característica inversa ao APRF gerada pelo DPD. Dessa forma o sinal de saída torna-se uma réplica linear da entrada. A curva de transferência do APRF, após a linearização é mostrada na FIGURA 1c.



FONTE: O AUTOR (2018)

Para projetar o DPD, necessita-se de um modelo comportamental de alta exatidão e baixo custo computacional [5]. Modelos comportamentais que

descrevem os sistemas por meio de equações matemáticas com coeficientes ajustados levando em consideração medições realizadas nos seus terminais de entrada e saída constituem-se nas melhores abordagens para fins de DPD [6]. A equação que descreve o modelo deve ser capaz de reproduzir não apenas não linearidades, mas também efeitos de memória presentes nos circuitos internos do APRF, atribuídos às redes de casamento de impedâncias e aos circuitos de polarização [6].

Este trabalho utiliza a série baseada em Volterra para desenvolvimento dos modelos comportamentais. A série geral de Volterra, mostrada em [6], é capaz de modelar sistemas não lineares com memória [7]. Porém, para ordem de truncamento polinomial e duração de memória tipicamente utilizadas em modelagem comportamental, a quantidade de coeficientes gerados é muito alta. Como consequência, a complexidade computacional também é grande. Estes dois fatores são suficientes para inviabilizar o uso da série geral de Volterra. Para resolver isto, é comum a utilização de séries com dimensão reduzida baseadas em Volterra, sem prejuízo na exatidão. Na literatura existem alternativas que simplificam a série geral de Volterra, chamadas séries compactas.

Uma alternativa, existente na literatura, é o modelo conhecido como polinômio de memória (MP) [8]. O MP utiliza apenas os termos unidimensionais (1D). Termos 1D são aqueles nos quais manipulam-se as informações de entrada extraídas em um único instante de tempo. Contudo, a utilização de apenas termos 1D pode comprometer a exatidão. Baseado nesse fato, as séries compactas de Volterra têm um grande avanço com a inclusão de termos bidimensionais (2D) [9] - [12]. Termos 2D são aqueles nos quais são manipuladas informações extraídas em dois instantes distintos de tempo. O modelo conhecido como polinômio de memória generalizado (GMP) [9] inclui subconjuntos dos termos 2D. Em particular, o GMP utiliza termos que envolvem o produto de amplitudes extraídas em um único instante de tempo. Em [10] é introduzido o modelo que contém todos os termos 2D. Em [11] é introduzida uma variação do modelo 2D. Trata-se também de um modelo 2D que possibilita controlar o número de parâmetros através de um truncamento adicional. Mais um modelo, encontrado na literatura, é apresentado em [12]. O modelo de [12] estende o modelo GMP, incluindo variáveis adicionais que

aumentam a exatidão do modelo e permitem controlar a complexidade computacional.

Embora muitos avanços tenham ocorrido na utilização de séries compactas baseadas em Volterra, ainda há muito espaço para implementação de melhorias, adicionando outras formas para simplificações nos modelos existentes ou realizando uma combinação entre eles.

Nos modelos comportamentais de [9] - [12], existem duas características em comum. Todos utilizam termos 1D e 2D, e apenas um truncamento de ordem polinomial e um truncamento para duração de memória para ambos os termos 1D e 2D.

Não foram investigados modelos comportamentais com truncamentos de ordem polinomial e duração de memória específicos para os termos 1D e 2D. Também não foram explorados modelos comportamentais que utilizam, além dos termos 1D e 2D, termos tridimensionais (3D) com truncamentos iguais ou específicos para os termos 1D, 2D e 3D. Por termos 3D entendem-se aqueles que manipulam informações extraídas em três instantes distintos de tempo.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

A principal contribuição deste trabalho é incorporar aos modelos fatores de truncamentos específicos para as diferentes dimensões (1D e 2D), além de testar modelos com três dimensões (3D) com truncamentos iguais e específicos para as diferentes dimensões (1D, 2D e 3D). Dessa forma, são propostas aqui novas abordagens para a modelagem comportamental de APRFs para fins de linearização. Essas abordagens podem ser aplicadas em conjunto com outras já disponíveis na literatura.

Espera-se que os modelos propostos tenham potencial para melhorar o compromisso entre exatidão e quantidade de coeficientes.

1.1.2 Objetivos Específicos

A abordagem proposta será inicialmente aplicada no modelo 2D completo. O modelo 2D completo será estendido para o modelo 3D completo. Em seguida, a estratégia para incorporar aos modelos fatores de truncamentos específicos para as diferentes dimensões será aplicada também ao modelo 3D completo.

Dois cenários de comparação serão utilizados para verificação da exatidão e da quantidade de coeficientes. Alguns modelos terão a mesma quantidade de coeficientes, e outros a mesma exatidão. Para os modelos com a mesma quantidade de coeficientes será verificado qual modelo é mais exato. Para os modelos com a mesma exatidão, será verificado qual modelo possui o menor número de coeficientes.

1.2 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Este trabalho está organizado da seguinte forma. O capítulo 2 apresenta a fundamentação teórica, incluindo as abordagens anteriores de modelos comportamentais para APRF e a métrica normalmente utilizada para análise da exatidão dos modelos. No capítulo 3 estão apresentados os novos modelos para modelagem comportamental de APRF. No capítulo 4 estão descritos o cenário para validação e os resultados incluindo a comparação com o modelo anterior. As conclusões são apresentadas no capítulo 5.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 APRF: EFICIÊNCIA E LINEARIDADE

A cadeia de transmissão de voz e dados na comunicação sem fio depende de um importante elemento, chamado APRF, que tem como função básica, a partir dos sinais de entrada, amplificá-los na saída [3].

As principais especificações que devem ser atendidas no projeto de um bom APRF são: linearidade e eficiência ou rendimento.

A eficiência é um parâmetro fundamental para o APRF para aumentar a autonomia da bateria ou reduzir os custos. Ela pode ser definida de duas maneiras. A eficiência de dreno é definida pela relação entre a potência de saída (P_{out}) e a potência entregue pela fonte de alimentação (P_{DC}), descrita por:

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{DC}} \quad (1)$$

A eficiência de potência adicionada (*Power Added Efficiency* - PAE) é descrita por:

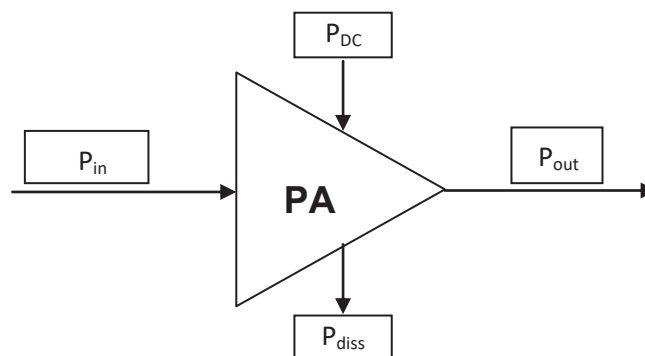
$$PAE = \frac{P_{out} - P_{in}}{P_{DC}} \quad (2)$$

onde P_{in} é a potência do sinal de entrada.

A PAE é muito utilizada em APRF porque a potência de entrada é normalmente uma parte significativa da potência de saída [13].

As potências envolvidas nas definições de eficiência aparecem indicadas na FIGURA 2 e suas relações matemáticas devem satisfazer $P_{DC} + P_{in} = P_{out} + P_{diss}$, onde P_{diss} é a potência dissipada pelo APRF.

FIGURA 2 - AMPLIFICADOR DE POTÊNCIA - DIAGRAMA DE POTÊNCIAS



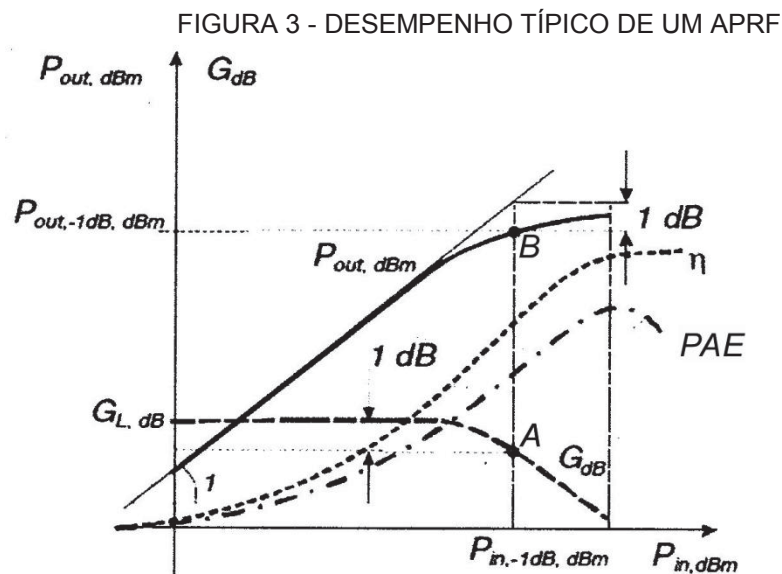
FONTE: O AUTOR (2018)

Os APRFs operando com alto nível de potência geram emissões espúrias fora da banda do sinal aplicado na sua entrada, efeito conhecido como espalhamento espectral. Dessa forma, canais adjacentes, alocados para outros usuários, sofrem interferências devido a esse fenômeno. As agências reguladoras são rigorosas e controlam essas emissões. O fato é que para aumentar a eficiência, o APRF opera fora da sua faixa linear. Dessa forma, o grande desafio é conseguir alta eficiência mantendo a linearidade do APRF. Se for desejável alta eficiência então deve-se operar o APRF com altos níveis de potência. Porém, se nesta condição o APRF ficar fora da faixa linear deve-se então recuar o sinal de entrada, que não é a situação desejada [2].

A linearidade pode ser definida pela capacidade do APRF não introduzir distorções na amplitude e na fase do sinal amplificado [14]. Em circuitos não lineares, como o APRF, a potência de saída não aumenta proporcionalmente com a potência de entrada para elevadas potências de entrada.

Através da FIGURA 3 pode-se verificar o comportamento não linear do APRF [15]. Na FIGURA 3, GL é definido como o ganho linear, obtido quando o amplificador é excitado por um sinal muito pequeno. Até certo nível de excitação o ganho permanece constante e igual a GL. O aumento da potência de entrada, P_{in} , faz com que o ganho diminua devido ao comportamento não linear do dispositivo. Esse fenômeno chama-se compressão de ganho, ilustrado pelo ponto A na FIGURA 3, e o parâmetro de desempenho comumente usado para caracterizá-lo é o ponto de compressão de 1 dB. Esse ponto é definido como o valor da potência de saída (ou entrada) onde o ganho diminui de 1 dB em relação ao ganho linear GL, e está representado pelo ponto B na FIGURA 3, que corresponde ao valor $P_{out(a)} OCP1$ (*Output Compression Point of 1 dB*) e $P_{in(a)} ICP1$ (*Input Compression Point of 1 dB*). Esse ponto se tornou uma referência para especificar a capacidade de potência de um APRF e também é considerado como o ponto limite de operação linear. Após esse ponto o amplificador atinge a saturação, que é a região onde a potência de saída atinge o valor máximo. Pela FIGURA 3 percebe-se que a eficiência cresce no regime linear e atinge o máximo após o ponto de compressão de 1

dB. Esse comportamento ilustra o compromisso entre linearidade e eficiência [15].



FONTE: MODIFICADO PELO AUTOR, EXTRAÍDO DE [15]

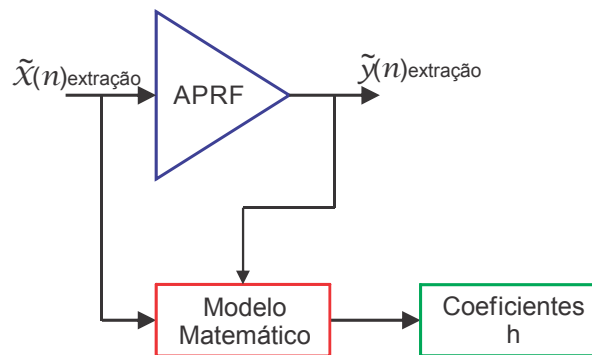
2.2 MODELAGEM COMPORTAMENTAL DE APRF

A modelagem comportamental, ou caixa preta, é utilizada quando o circuito equivalente do APRF não está disponível. Através de medições realizadas na entrada e na saída do APRF, seu comportamento é simulado por um modelo matemático.

Para a modelagem comportamental, serão utilizados dois conjuntos de entradas e saídas medidas no APRF. Um deles será utilizado para extração dos coeficientes e o outro para determinar a exatidão da modelagem. A modelagem é realizada aplicando-se o mesmo sinal na entrada do APRF e ao modelo.

O primeiro conjunto de entradas e saídas será aplicado ao modelo comportamental, e como resultado serão extraídos os coeficientes que representam o APRF. A FIGURA 4 mostra o diagrama da modelagem comportamental para extração dos coeficientes, onde $\tilde{x}(n)_{\text{extração}}$ é a entrada medida, aplicada ao APRF e ao modelo matemático, $\tilde{y}(n)_{\text{extração}}$ é a saída medida no APRF e h são os coeficientes extraídos que representam o APRF.

FIGURA 4 – DIAGRAMA PARA MODELAGEM COMPORTAMENTAL DE UM APRF - EXTRAÇÃO

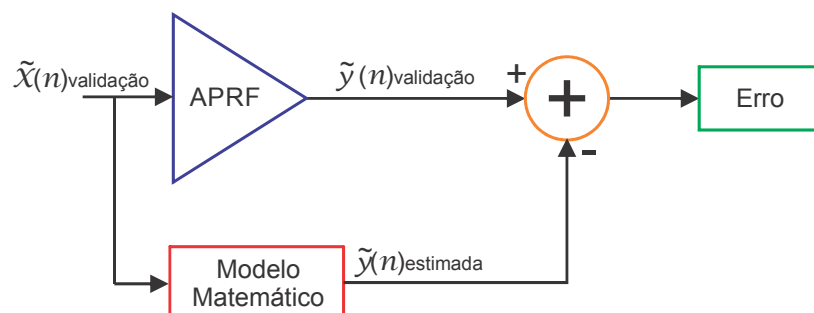


FONTE: O AUTOR (2018)

Com os coeficientes conhecidos, o segundo conjunto de entradas e saídas será aplicado ao modelo para validação dos resultados.

A saída estimada pelo modelo é então comparada com o sinal de saída do APRF. O erro é calculado pela diferença entre o sinal real e o estimado. A FIGURA 5 representa o diagrama da modelagem comportamental para validação, onde $\tilde{x}(n)_{\text{validação}}$ é a entrada medida, aplicada ao APRF e ao modelo matemático, $\tilde{y}(n)_{\text{validação}}$ é a saída medida no APRF e $\tilde{y}(n)_{\text{estimada}}$ é a saída estimada pelo modelo matemático.

FIGURA 5 – DIAGRAMA PARA MODELAGEM COMPORTAMENTAL DE UM APRF - VALIDAÇÃO



FONTE: O AUTOR (2018)

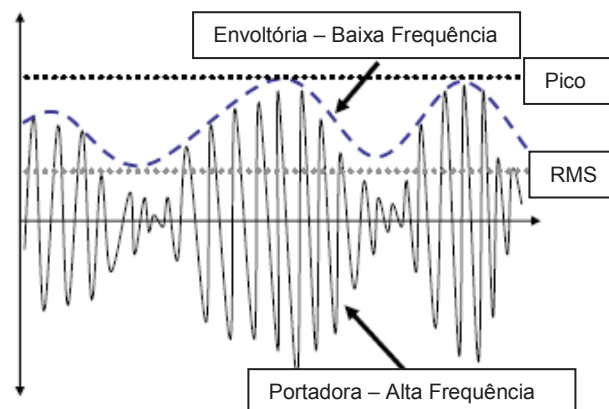
O modelo comportamental de um APRF deve ser capaz de estimar os efeitos não lineares, atribuídos à compressão do ganho de potência, e os efeitos de memória, atribuídos aos circuitos de polarização e casamento de impedâncias. Para fins de modelagem comportamental o APRF é visto como um sistema de uma entrada e uma saída, sendo que os sinais a serem

manipulados pelo modelo correspondem às envoltórias de valores complexos. A série de Volterra permite a descrição de um sistema dinâmico não linear, como é o caso do APRF [6].

2.2.1 Comportamento do APRF

A transmissão de dados nas redes de telecomunicações é realizada a partir de um sinal de radiofrequência (RF), com frequência na ordem de GHz. Esse sinal é modulado por uma envoltória complexa com largura de banda na faixa de MHz. Observando a ordem de grandeza da frequência da portadora de RF e da largura de banda da envoltória, é possível concluir que a largura de banda é muito menor que a frequência central e, por essa razão, os APRFs são classificados como sistemas passa-banda [16]. Na FIGURA 6 podem ser observadas estas características.

FIGURA 6 - SINAL DE RF MODULADO EM AMPLITUDE E FASE



FONTE: EXTRAÍDO DE [17]

Matematicamente o sinal aplicado na entrada do APRF pode ser descrito por:

$$x(t) = \mathcal{R}e[\tilde{x}(t)e^{j\omega_c t}] = |\tilde{x}(t)|\cos(\omega_c t + \theta(t)), \quad (3)$$

onde ω_c é a frequência da portadora, $\theta(t)$ é o ângulo de fase da envoltória complexa, $|\tilde{x}(t)|$ é a amplitude da envoltória complexa.

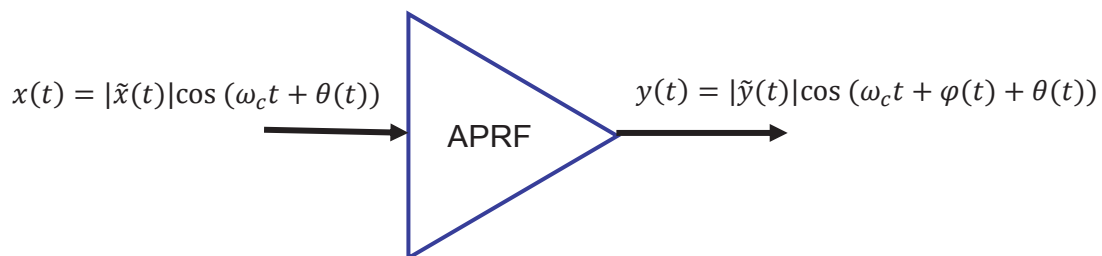
O sinal de saída do APRF também tem a mesma frequência da portadora e é modulado por uma envoltória de valor complexo de acordo com:

$$y(t) = \mathcal{R}e[\tilde{y}(t)e^{j\omega_c t}] = |\tilde{y}(t)|\cos(\omega_c t + \varphi(t) + \theta(t)), \quad (4)$$

onde ω_c é a frequência da portadora, $\theta(t)$ é o ângulo de fase da envoltória complexa de entrada, $|\tilde{y}(t)|$ é a amplitude da envoltória complexa, $\varphi(t)$ é a diferença entre as fases das envoltórias de entrada e saída.

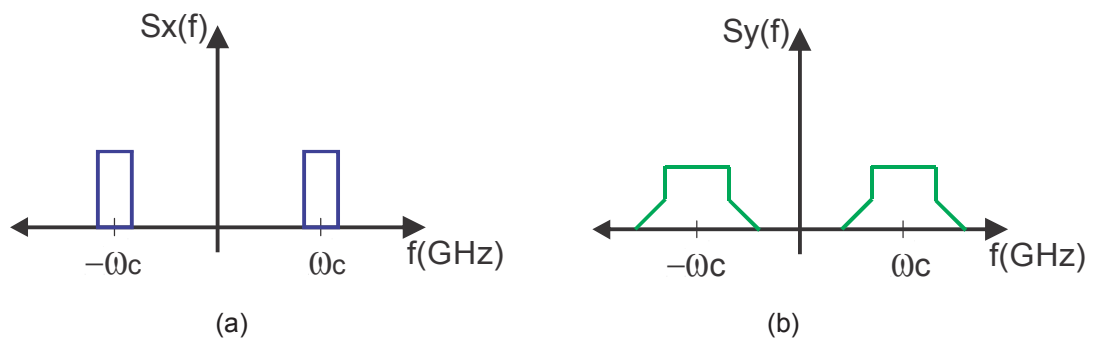
A FIGURA 7 mostra o APRF como um sistema de uma entrada e uma saída, enquanto a FIGURA 8 mostra as densidades espectrais de potência dos sinais de entrada e saída. Na FIGURA 8(b) pode-se observar o espalhamento do espectro. Essa característica é devida a não linearidade do APRF.

FIGURA 7 – SINAIS DE ENTRADA E SAÍDA DO APRF



FONTE: O AUTOR (2018)

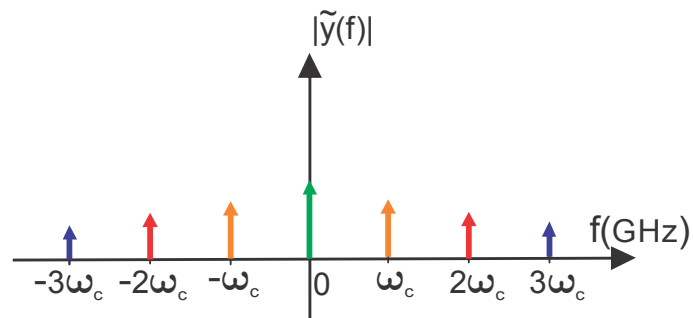
FIGURA 8 – ESPECTRO DOS SINAIS DE RF NO APRF: (a) ENTRADA (b) SAÍDA



FONTE: O AUTOR (2018)

Sendo o APRF um sistema não linear, quando excitado por um tom de frequência ω_c , o sinal de saída conterá múltiplos inteiros da frequência fundamental, chamadas de distorções harmônicas, identificados por $0\omega_c$, $2\omega_c$ e $3\omega_c$, indicadas na FIGURA 9.

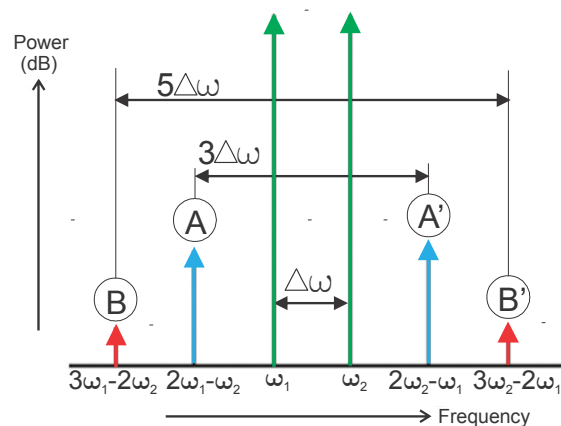
FIGURA 9 - DISTORÇÕES HARMÔNICAS NA SAÍDA PARA UM APRF EXCITADO POR UM TOM NA ENTRADA



FONTE: O AUTOR (2018)

Se o APRF for excitado por dois tons, além das distorções harmônicas, a característica não linear do APRF faz com que apareçam as distorções de intermodulação. Estas distorções de intermodulação são exemplificadas na FIGURA 10 por $2\omega_2 - \omega_1$, $3\omega_2 - 2\omega_1$, $2\omega_1 - \omega_2$ e $3\omega_1 - 2\omega_2$. Essas distorções têm como consequência o alargamento da banda principal. Isso faz com que ocorram interferências nos canais adjacentes.

FIGURA 10 – EFEITOS DE INTERMODULAÇÃO CAUSADOS POR OPERAÇÃO NÃO LINEAR DO APRF QUANDO SUJEITO À ENTRADA COM DOIS TONS



FONTE: MODIFICADO PELO AUTOR, EXTRAÍDO DE [4]

O alargamento das bandas pode ser demonstrado matematicamente através da seguinte análise. Seja $\omega_2 = \omega_1 + \Delta\omega$, então:

$$2\omega_1 - \omega_2 = 2\omega_1 - \omega_1 - \Delta\omega = \omega_1 - \Delta\omega, \quad (5)$$

sendo designado por A na FIGURA 10, e:

$$2\omega_2 - \omega_1 = 2\omega_1 - \omega_1 + 2\Delta\omega = \omega_1 + 2\Delta\omega , \quad (6)$$

sendo designado por A' na FIGURA 10.

Fazendo (A' - A) obtêm-se:

$$\omega_1 + 2\Delta\omega - (\omega_1 - \Delta\omega) = 3\Delta\omega , \quad (7)$$

ou seja, uma diferença que é equivalente a 3 vezes a distância original entre os 2 tons. De modo similar,

$$3\omega_1 - 2\omega_2 = 3\omega_1 - 2\omega_1 - 2\Delta\omega = \omega_1 - 2\Delta\omega , \quad (8)$$

sendo designado por B na FIGURA 10, e:

$$3\omega_2 - 2\omega_1 = 3\omega_1 + 3\Delta\omega - 2\omega_1 = \omega_1 + 3\Delta\omega , \quad (9)$$

sendo designado por B' na FIGURA 10.

Fazendo (B' - B) têm-se:

$$\omega_1 + 3\Delta\omega - (\omega_1 - 2\Delta\omega) = 5\Delta\omega , \quad (10)$$

ou seja, uma diferença que é equivalente a 5 vezes a distância original entre os 2 tons.

A forma mais simples de representar um sistema não linear, caso do APRF, é por meio de polinômios da forma de [8], [16], definido por:

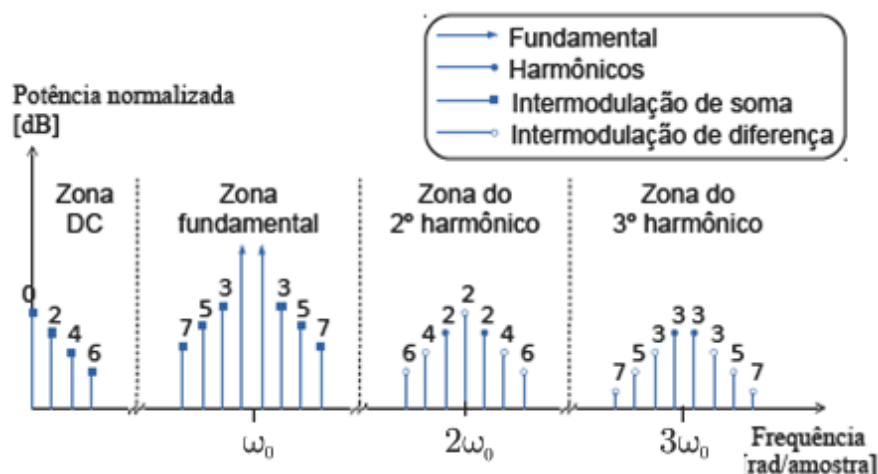
$$y(t) = \sum_{p=0}^P b_p \cdot x^p(t) , \quad (11)$$

onde $x(t)$ é o sinal de entrada em RF e b_p são os coeficientes do polinômio.

Quando esse APRF é excitado por uma entrada de 2 tons, além dos produtos de intermodulação ao redor das frequências fundamentais, são gerados produtos de intermodulação localizados em torno das harmônicas e

próximos de CC. A FIGURA 11 reúne ambas as distorções para uma série de potências até 7ª ordem, $P=7$ em (11), na qual são discriminadas as intermodulações provenientes da soma e diferença dos dois tons de entrada e das harmônicas. Os números sobre cada raia indicam a ordem da intermodulação [18].

FIGURA 11 – ESPECTRO DO SINAL DE SAÍDA PARA UM SINAL DE DOIS TONS COMO ESTÍMULO



FONTE: EXTRAÍDO DE [18]

O sinal aplicado ao APRF é uma amostra de um sinal analógico. Dessa forma, deve atender o Teorema de Nyquist [4], [19]. Esse teorema afirma que um sinal amostrado e limitado em banda pode ser completamente recuperado a partir de um número de amostras igualmente espaçadas no tempo, se a taxa de amostragem for maior do que o dobro da frequência máxima do sinal.

No caso de sinais de RF a frequência da portadora é da ordem de GHz, logo a frequência de amostragem teria que ser muito alta, bem como o número de amostras passadas para modelar o efeito de memória causado pelos dispositivos passivos do circuito. Isso torna este tipo de modelo, chamado de passa-banda, mais complicado e complexo computacionalmente. Para resolver esta situação é possível utilizar para modelagem do APRF o seu equivalente passa-baixas. A vantagem deste tipo de modelo é que a frequência de amostragem é muito menor do que a do modelo passa-banda. Poucas amostras de instantes passados são necessárias para garantir a exatidão do modelo [16]. Além desta,

outra vantagem na utilização do equivalente passa-baixas é a redução computacional.

A obtenção do equivalente passa-baixas pode ser demonstrada matematicamente, fazendo em (11) a ordem polinomial $P = 3$ e $x(t)$ conforme (3). A resposta do APRF será:

$$y(t) = b_0 + \frac{1}{2}b_2|\tilde{x}(t)|^2 + \left[b_1|\tilde{x}(t)| + \frac{3}{4}b_3|\tilde{x}(t)|^3 \right] \cos(\omega_c t + \theta(t)) + \frac{1}{2}b_2|\tilde{x}(t)|^2 \cos(2\omega_c t + 2\theta(t)) + \frac{1}{4}b_3|\tilde{x}(t)|^3 \cos(3\omega_c t + 3\theta(t)). \quad (12)$$

Em (12) a componente CC é bloqueada pelo capacitor da rede de casamento de impedância de saída. As harmônicas de segunda e terceira ordem são filtradas na saída do APRF. Desta forma, em (12), o único termo que influencia a saída do APRF é:

$$y(t) = \left[b_1|\tilde{x}(t)| + \frac{3}{4}b_3|\tilde{x}(t)|^3 \right] \cos(\omega_c t + \theta(t)). \quad (13)$$

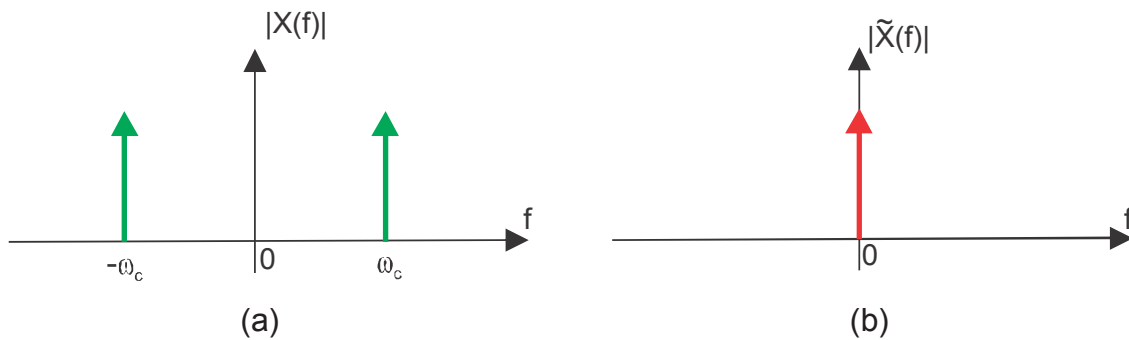
De (13), a envoltória do sinal de saída de (4) é dada por:

$$\tilde{y}(t) = \left[b_1\tilde{x}(t) + \frac{3}{4}b_3\tilde{x}(t)|\tilde{x}(t)|^2 \right]. \quad (14)$$

O modelo mostrado em (14) é o equivalente passa-baixas. Em (14) pode ser observado que a resposta do sinal não depende diretamente da frequência da portadora [16]. Porém os dados utilizados para extração dos coeficientes variam com ω_c .

Graficamente, o resultado anterior pode ser mostrado nas figuras 12 e 13. A FIGURA 12(a) mostra o sinal de RF a um tom definido por (3), na entrada do APRF, enquanto a FIGURA 12(b) mostra apenas a envoltória complexa do sinal de RF definido por (3).

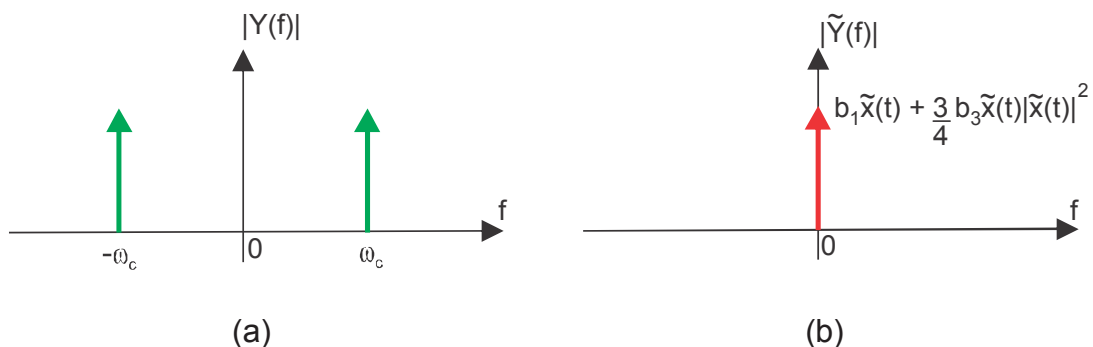
FIGURA 12 – SINAL DE ENTRADA A UM TOM DEFINIDO POR (3): (a) SINAL DE RF (b) ENVOLTÓRIA COMPLEXA



FONTE: MODIFICADO PELO AUTOR, EXTRAÍDO DE [11]

A FIGURA 13(a) mostra o sinal de RF a um tom definido por (13), na saída do APRF, enquanto a FIGURA 13(b) mostra apenas a envoltória complexa na saída do APRF, definido por (14).

FIGURA 13 - (a) SINAL DE RF DEFINIDO POR (13) (b) ENVOLTÓRIA COMPLEXA DEFINIDA POR (14)



FONTE: MODIFICADO PELO AUTOR, EXTRAÍDO DE [11]

De acordo com [20], os modelos equivalentes passa-baixas não trabalham diretamente com a portadora. Assim deve-se garantir que somente as contribuições na zona fundamental sejam geradas pelo modelo comportamental.

Para atender essa exigência, uma vez que as contribuições fora da zona fundamental não contribuem com informações úteis sobre o comportamento do APRF, nos modelos a serem abordados aqui, em cada termo que envolve informações de entrada, uma e somente uma amostra complexa está presente, sendo esta multiplicada por uma potência variável da amplitude da envoltória de entrada.

2.3 SÉRIES DE VOLTERRA NA MODELAGEM COMPORTAMENTAL

2.3.1 Série Completa de Volterra

Séries de Volterra são capazes de modelar sistemas não lineares com memória [7]. Em uma série de Volterra discreta no tempo, a saída no instante de tempo atual, $\tilde{y}(n)$, é formulada como uma função polinomial das entradas aplicadas nos instantes de tempo atual, $\tilde{x}(n)$, e passados, $\tilde{x}(n - m)$ para $m = 1, 2, \dots, M$, onde M é o truncamento de duração de memória, P é o truncamento de ordem polinomial, p define a quantidade de amplitudes da envoltória de entrada e m define a entrada no instante atual, quando $m = 0$, e as entradas passadas, quando $m = 1, 2, \dots, M$ [6]. Na prática, a ordem polinomial é truncada em P . A equação constitutiva da série de Volterra é:

$$\tilde{y}(n) = \sum_{p=0}^{P-1} \sum_{m_1=0}^M \sum_{m_2=0}^M \sum_{m_3=m_2}^M \dots \sum_{m_{p+1}=m_p}^M \tilde{h}_{p+1, m_1, m_2, \dots, m_{p+1}} \cdot \tilde{x}(n - m_1) \cdot \prod_{j=1}^p |\tilde{x}(n - m_{j+1})|, \quad (15)$$

onde $\tilde{h}_{p+1, m_1, m_2, \dots, m_{p+1}}$ são os coeficientes complexos e $|\cdot|$ indica a amplitude da entrada complexa.

A série de Volterra é linear nos seus coeficientes, sendo possível escrever a sua saída por uma somatória de contribuições, onde cada contribuição é dada pelo produto entre um coeficiente e uma função das entradas. Para a modelagem de APRFs, essa função de entradas é obtida através da multiplicação de uma única envoltória de valor complexo por uma quantidade variável de amplitudes da envoltória de entrada. Essa função da entrada pode envolver entradas extraídas em um único instante de tempo ou em mais de um instante, podendo ser de até $(M + 1)$ instantes de tempo distintos. Assim, é comum a utilização da nomenclatura unidimensional (1D), bidimensional (2D), tridimensional (3D), e assim por diante, para os termos que compõem a série de Volterra. Termos unidimensionais são aqueles em que a função das entradas utiliza um único instante de tempo, por exemplo, $|x(n - 3)|^2 x(n - 3)$. Nos termos bidimensionais, as funções das entradas envolvem dois instantes de tempo diferentes, por exemplo, $|x(n - 2)|x(n - 3)$. Nos

tridimensionais, informações de três instantes de tempo distintos são empregadas na função das entradas, por exemplo, $|x(n-1)|^2|x(n-3)|x(n-2)$.

Contudo, a sua quantidade de coeficientes é fortemente condicionada à ordem de truncamento polinomial e à duração da memória. Para os valores de truncamento tipicamente usados em APRFs, a quantidade de coeficientes torna-se extremamente alta, inviabilizando o uso da série completa de Volterra. Para reduzir a complexidade computacional da série de Volterra, sem deteriorar sua exatidão, diferentes abordagens foram propostas na literatura.

2.4 SÉRIES DE VOLTERRA SIMPLIFICADAS

Trabalhos anteriores utilizaram a série de Volterra e, a partir dela, foram desenvolvidos modelos comportamentais compactos e eficientes para melhoria no erro e redução da quantidade de coeficientes.

2.4.1 Polinômio sem Memória

A modelagem de um APRF, em banda base, pode ser descrita pelo polinômio complexo [8], de acordo com:

$$\tilde{y}(n) = \tilde{x}(n) \sum_{k=1}^P b_k |\tilde{x}(n)|^{k-1}, \quad (16)$$

onde $\tilde{x}(n)$ é a entrada complexa, P a ordem polinomial, b_k são os coeficientes e $\tilde{y}(n)$ é a saída complexa. A desvantagem em (16) está no fato de não refletir o comportamento de um APRF real. Um APRF real possui memória. Ter memória significa que a saída do APRF depende, além da entrada atual, também das entradas passadas.

2.4.2 Polinômio de Memória (MP)

O trabalho de [8] apresenta um modelo unidimensional com memória. São retidas apenas as contribuições que envolvem multiplicações de informações de envoltória de entrada extraídas em um mesmo instante de

tempo. Esse modelo é conhecido na literatura como MP e sua equação é dada por:

$$\tilde{y}(n) = \sum_{k=1}^{P_m} \sum_{m=0}^M b_{k,m} \tilde{x}(n-m) |\tilde{x}(n-m)|^{k-1}, \quad (17)$$

onde P_m é a ordem do polinômio, M a duração da memória, $b_{k,m}$ são os coeficientes e $\tilde{x}(n-m)$, para $m = 1, 2, \dots, M$, são as entradas passadas. A conclusão de [8] é que os modelos comportamentais devem possuir memória.

O modelo mostrado em (17) só produz termos unidimensionais. Em função disto, se for desenvolvido e comparado com modelos bidimensionais, para a mesma ordem polinomial e duração de memória, o número de coeficientes será significativamente menor. Isso reflete a conclusão de [8]. Um baixo atraso de memória tem como resultado poucos coeficientes, como consequência a exatidão é menor.

2.4.3 Polinômio de Memória Generalizado (GMP)

Esse modelo comportamental, apresentado em [9], é bidimensional e com memória.

A busca por modelos com maior exatidão e redução da complexidade computacional para fins de DPD em banda larga foi o foco principal no GMP. O modelo combina o MP com termos cruzados entre o sinal e atraso e/ou elevando os termos da envoltória a uma potência. A sua equação é dada por:

$$\begin{aligned} \tilde{y}(n) = & \sum_{k=0}^{K_a-1} \sum_{l=0}^{L_a-1} a_{k,l} \tilde{x}(n-l) |\tilde{x}(n-l)|^k \\ & + \sum_{k=1}^{K_b} \sum_{l=0}^{L_b-1} \sum_{m=1}^{M_b} b_{k,l,m} \tilde{x}(n-l) |\tilde{x}(n-l-m)|^k \\ & + \sum_{k=1}^{K_c} \sum_{l=0}^{L_c-1} \sum_{m=1}^{M_c} c_{k,l,m} \tilde{x}(n-l) |\tilde{x}(n-l+m)|^k, \end{aligned} \quad (18)$$

onde $\tilde{x}(n)$ são entradas, $\tilde{y}(n)$ as saídas estimadas, K_a, L_a e $a_{k,l}$ são a ordem da não linearidade, o atraso de memória e os coeficientes, respectivamente, do núcleo (*kernel*) onde somente termos unidimensionais são obtidos, ou seja, a função das entradas utiliza apenas um instante de tempo. K_b, L_b, M_b e $b_{k,l,m}$ são a ordem da não linearidade, o índice de atraso dos termos cruzados, o atraso de memória e os coeficientes, respectivamente, do núcleo onde encontram-se os termos bidimensionais em que a amplitude é atrasada em relação à envoltória complexa. K_c, L_c, M_c e $c_{k,l,m}$ são a ordem da não linearidade, o índice de atraso dos termos cruzados, o atraso de memória e os coeficientes, respectivamente, dos termos bidimensionais onde a amplitude está adiantada em relação à envoltória complexa.

Nos núcleos bidimensionais, para os coeficientes $b_{k,l,m}$ e $c_{k,l,m}$, os termos $|\tilde{x}(n-l-m)|^k$ e $|\tilde{x}(n-l+m)|^k$, respectivamente, referem-se aos termos cruzados. Se o modelo for desenvolvido e observar-se a condição específica onde $k = 1, l = 0, m = 1$, por exemplo, chega-se a $b_{1,0,1}|\tilde{x}(n)||\tilde{x}(n-1)|$ e $c_{1,0,1}|\tilde{x}(n)||\tilde{x}(n+1)|$. O termo $c_{1,0,1}$ caracteriza uma entrada futura. Para evitar essa condição não causal deve-se fazer $l \geq m$. Fazendo esta restrição, os núcleos com termos cruzados tornam possível obter entradas passadas distintas em cada núcleo.

2.4.4 Polinômio de Memória Generalizado e Estendido

Um estudo posterior, mostrado em [12], estende o modelo GMP, acrescentando duas somatórias com quatro novos fatores de truncamento, além dos existentes no GMP. Essas novas variáveis definem a dimensão do modelo e permitem controlar a sua complexidade. Esse modelo utiliza termos cruzados específicos em seus núcleos, inclusive nos adicionais. Diferente do modelo GMP, esse modelo utiliza para as não linearidades K_a, K_b e K_c somente valores ímpares. A equação desse modelo é:

$$\begin{aligned}
\tilde{y}(n) = & \sum_{\substack{k=1 \\ k\text{-odd}}}^{K_a} \sum_{q=0}^{Q_a} a_{k,q} \tilde{x}(n-q) |\tilde{x}(n-q)|^{k-1} \\
& + \sum_{\substack{k=3 \\ k\text{-odd}}}^{K_b} \sum_{q=0}^{Q_b} \sum_{l=1}^{L_b} b_{k,q,l} \tilde{x}(n-q) |\tilde{x}(n-q-l)|^{k-1} \\
& + \sum_{\substack{k=3 \\ k\text{-odd}}}^{K_c} \sum_{q=0}^{Q_c} \sum_{l=1}^{L_c} c_{k,q,l} \tilde{x}(n-q) |\tilde{x}(n-q+l)|^{k-1} \\
& + \sum_{q=0}^{Q_d} \sum_{l=1}^{L_d} d_{q,l} \tilde{x}^*(n-q) \tilde{x}^2(n-q-l) \\
& + \sum_{q=0}^{Q_e} \sum_{l=1}^{L_e} e_{q,l} \tilde{x}^*(n-q) \tilde{x}^2(n-q+l),
\end{aligned} \tag{19}$$

onde K_a , K_b e K_c são as ordens de não linearidades dos três primeiros núcleos, respectivamente. Q_a , Q_b , Q_c , Q_d e Q_e são as durações de memória dos cinco núcleos, respectivamente. L_b , L_c , L_d e L_e são os índices de atraso ou avanço dos termos cruzados dos quatro últimos núcleos. $a_{k,q}$, $b_{k,q,l}$, $c_{k,q,l}$, $d_{q,l}$ e $e_{q,l}$ são os coeficientes do modelo.

2.4.5 Polinômio de Memória Bidimensional Completo

Um estudo apresentado em [10] inclui todas as contribuições unidimensionais e bidimensionais. Esse modelo 2D reduz bastante a quantidade de coeficientes de uma série de Volterra e, como consequência, reduz a complexidade computacional.

Cabe citar que o modelo GMP, proposto em [9], pode ser visto como um caso particular do modelo 2D proposto em [10], pois o modelo GMP não inclui todos os termos 2D possíveis. Assim, um dos objetivos desse artigo foi investigar a perda de precisão do GMP ao não incluir todos os termos 2D.

A expectativa é que para a condição em que os truncamentos de ordem polinomial P e duração de memória M sejam iguais, a precisão do modelo seja superior a do GMP, uma vez que o modelo inclui todos os termos do GMP e mais alguns termos extras que também geram contribuições na zona fundamental e que podem contribuir significativamente para melhorar a qualidade das estimativas. A equação do modelo 2D completo é:

$$\begin{aligned} \tilde{y}(n) = & \sum_{p_1=1}^{P-1} \sum_{\substack{p_2=0 \\ \text{if } p_2+p_1 < P}}^{P-1} \sum_{m_1=0}^M \sum_{\substack{m_2=0 \\ \text{if } m_2 \neq m_1}}^M \tilde{h}_{p_1,p_2,m_1,m_2} |\tilde{x}(n-m_1)|^{p_1} |\tilde{x}(n-m_2)|^{p_2} \tilde{x}(n-m_2) \\ & + \sum_{p_1=0}^{P-1} \sum_{m_1=0}^M \tilde{h}_{p_1,m_1} |\tilde{x}(n-m_1)|^{p_1} \tilde{x}(n-m_1), \end{aligned} \quad (20)$$

onde M representa a duração de memória, P indica o truncamento de ordem polinomial e $\tilde{h}_{p_1,p_2,m_1,m_2}$ são os coeficientes do modelo. Em (20), verifica-se que há apenas 2 truncamentos: o de ordem polinomial P e o de duração de memória M , iguais para os termos unidimensionais e bidimensionais.

A restrição $p_2 + p_1 < P$ garante que as contribuições geradas por (20) envolverão, no máximo, o produto de P informações de envoltória de valor complexo. A condição $m_2 \neq m_1$ garante que apenas termos bidimensionais sejam gerados neste núcleo.

O resultado do modelo 2D proposto em [10] comparado com o modelo GMP proposto em [9] em um cenário onde os truncamentos da ordem polinomial e da duração de memória são idênticos, reduziu o erro quadrático médio quando usado para modelar as características de transferência direta e inversa de um APRF.

2.4.6 Polinômio de Memória 2D Modificado

Um novo trabalho, apresentado em [11], tem como objetivo a redução no número de parâmetros, com a introdução de um truncamento adicional, definido por S em (21). Nesse modelo, o número de parâmetros pode ser alterado variando-se o valor de S . Considere-se as seguintes situações. Se o valor para o truncamento S for igual ao seu valor máximo, ou seja, $P-1$, o

modelo inclui todas as contribuições unidimensionais e bidimensionais. Assim, o modelo resultante é equivalente ao modelo apresentado em [10]. Se o valor do truncamento S for menor do que $P-1$, algumas contribuições unidimensionais e bidimensionais são desprezadas. Dessa forma, conforme o valor de S diminui, o número de parâmetros também diminui. Essa situação traz como benefício a redução na complexidade computacional. A equação desse modelo é:

$$\tilde{y}(n) = \sum_{p=0}^{P-1} \sum_{\substack{s=0 \\ \text{if } s+p < P}}^S \sum_{m_1=0}^M \sum_{m_2=0}^M \tilde{h}_{p,s,m_1,m_2} |\tilde{x}(n-m_1)|^p |\tilde{x}(n-m_2)|^s \tilde{x}(n-m_2), \quad (21)$$

onde M representa a duração de memória, P indica o truncamento de ordem polinomial, S é o truncamento de ordem polinomial adicional e \tilde{h}_{p,s,m_1,m_2} são os coeficientes do modelo. Em (21), os truncamentos de ordem polinomial P e o de duração de memória M são iguais para os termos unidimensionais e bidimensionais.

Cabe citar que o modelo GMP apresentado em (18) pode ser visto como um caso particular do modelo definido em (21). Isso é obtido fazendo S igual a zero.

Os resultados obtidos para esse modelo foram satisfatórios tanto na melhoria do erro quanto na redução de coeficientes.

2.5 MÉTRICAS PARA VALIDAÇÃO

2.5.1 Erro Quadrático Médio Normalizado (NMSE)

O NMSE consegue avaliar o comportamento do modelo dentro da banda de atuação do APRF. Fornece uma medida de quanto o modelo se desvia do APRF real no canal principal. O NMSE [21] é calculado por:

$$NMSE = 10 \log_{10} \left[\frac{\sum_{n=1}^N |\tilde{y}_{medido}(n) - \tilde{y}_{estimado}(n)|^2}{\sum_{n=1}^N |\tilde{y}_{medido}(n)|^2} \right], \quad (22)$$

onde, \tilde{y}_{medido} e $\tilde{y}_{estimado}$ indicam as saídas medidas e estimadas pelo modelo, respectivamente, e N é a quantidade total de amostras.

3 NOVAS ABORDAGENS PARA MODELAGEM COMPORTAMENTAL DE APRFs

Nos modelos comportamentais citados no capítulo 2, existem duas características em comum: todos utilizam termos 1D e 2D e apenas um truncamento de ordem polinomial e um truncamento para duração de memória.

A partir do modelo bidimensional definido em (20), baseado na série de Volterra em (15), o objetivo deste trabalho é propor três novas abordagens comportamentais para fins de linearização de APRFs. As novas abordagens irão incorporar, aos modelos, diferentes fatores de truncamentos para diferentes dimensões. Essas novas abordagens podem ser aplicadas em conjunto com outras disponíveis na literatura.

A primeira abordagem será aplicada ao modelo bidimensional definido em (20). Esse modelo será estendido para o modelo tridimensional completo, ou seja, com truncamentos de ordem polinomial P e duração de memória M iguais para os termos 1D, 2D e 3D.

A segunda abordagem será aplicada em conjunto com o modelo bidimensional definido em (20). Neste modelo serão incluídos truncamentos específicos para cada dimensão. Em seguida, na terceira abordagem, ao modelo tridimensional completo será aplicada a estratégia dos truncamentos específicos para cada dimensão.

3.1 MODELO TRIDIMENSIONAL COM TRUNCAMENTOS IGUAIS

O modelo definido em (20) é bidimensional e possui os truncamentos de ordem polinomial P e duração de memória M iguais para os termos 1D e 2D. Nesta configuração o modelo permite obter todas as contribuições unidimensionais e bidimensionais.

O modelo definido em (20) aqui é estendido para o modelo 3D completo. Esse modelo 3D completo também possui seus truncamentos de ordem polinomial e duração de memória iguais para todas as dimensões, ou seja, 1D, 2D e 3D. Dessa forma, o modelo permite obter todas as contribuições unidimensionais, bidimensionais e tridimensionais. A equação do modelo 3D completo é:

$$\begin{aligned}
\tilde{y}(n) = & \sum_{p_1=1}^{P-1} \sum_{p_2=0}^{P-1} \sum_{\substack{p_3=0 \\ \text{if } p_3+p_2+p_1 < P}}^{P-1} \sum_{m_1=0}^M \sum_{m_2=0}^M \sum_{\substack{m_3=0 \\ \text{if } m_3 \neq m_2 \\ \text{if } m_2 \neq m_1 \\ \text{if } m_3 \neq m_1}}^M \tilde{h}_{p_1,p_2,p_3,m_1,m_2,m_3} |\tilde{x}(n - m_1)|^{p_1} \\
& |\tilde{x}(n - m_2)|^{p_2} |\tilde{x}(n - m_3)|^{p_3} \tilde{x}(n - m_3) + \\
& + \sum_{p_1=1}^{P-1} \sum_{\substack{p_2=0 \\ \text{if } p_2+p_1 < P}}^{P-1} \sum_{m_1=0}^M \sum_{\substack{m_2=0 \\ \text{if } m_2 \neq m_1}}^M \tilde{h}_{p_1,p_2,m_1,m_2} |\tilde{x}(n - m_1)|^{p_1} |\tilde{x}(n - m_2)|^{p_2} \tilde{x}(n - m_2) + \\
& + \sum_{p_1=0}^{P-1} \sum_{m_1=0}^M \tilde{h}_{p_1,m_1} |\tilde{x}(n - m_1)|^{p_1} \tilde{x}(n - m_1), \tag{23}
\end{aligned}$$

onde $\tilde{x}(n)$ é a entrada complexa, $\tilde{y}(n)$ é a saída complexa, P é a ordem polinomial, M é a duração da memória e \tilde{h} são os coeficientes do modelo.

A restrição $p_2 + p_1 < P$ e $p_3 + p_2 + p_1 < P$ nos núcleos bidimensionais e tridimensionais, respectivamente, garantem que as contribuições geradas por (23) envolverão, no máximo, o produto de P de informações de envoltória de valor complexo. Ainda, as condições $m_2 \neq m_1$, $m_3 \neq m_2$, $m_2 \neq m_1$ e $m_3 \neq m_1$ garantem que apenas termos bidimensionais e tridimensionais, respectivamente, sejam gerados nestes núcleos.

Considerando $P = 3$ e $M = 5$ em (20) e (23) e aplicando as restrições, as tabelas de 1 e 2 mostram a quantidade total de coeficientes e a quantidade de termos 1D e 2D gerados pelos modelos em (20) e 1D, 2D e 3D gerados em (23).

TABELA 1 - NÚMERO DE COEFICIENTES GERADOS EM (20).

Truncamentos		Nº de Coeficientes		
P	M	Total	1D	2D
3	5	108	18	90

FONTE: O AUTOR (2018)

Na TABELA 1 observa-se que, em relação ao total de coeficientes gerados pelo modelo comportamental, para os valores dos truncamentos de

ordem polinomial e de duração de memória, tem-se 16,67% de termos 1D e 83,33% de termos 2D.

TABELA 2 - NÚMERO DE COEFICIENTES GERADOS EM (23).

Truncamentos		Nº de Coeficientes			
P	M	Total	1D	2D	3D
3	5	168	18	90	60

FONTE: O AUTOR (2018)

Na TABELA 2 observa-se que, em relação ao total de coeficientes gerados pelo modelo comportamental, para os valores dos truncamentos de ordem polinomial e de duração de memória, tem-se 10,71% de termos 1D, 53,57% de termos 2D e 35,71% de termos 3D.

3.2 MODELO BIDIMENSIONAL COM TRUNCAMENTOS ESPECÍFICOS

O modelo definido em (20), existente na literatura, aqui é modificado com a inclusão de truncamentos específicos para os termos unidimensionais e bidimensionais. A equação do modelo 2D proposto é:

$$\begin{aligned}
 \tilde{y}(n) = & \sum_{p_1=1}^{P2-1} \sum_{\substack{p_2=0 \\ \text{if } p_2+p_1 < P2}}^{P2-1} \sum_{m_1=0}^{M2} \sum_{\substack{m_2=0 \\ \text{if } m_2 \neq m_1}}^{M2} \tilde{h}_{p_1,p_2,m_1,m_2} |\tilde{x}(n-m_1)|^{p_1} |\tilde{x}(n-m_2)|^{p_2} \tilde{x}(n-m_2) \\
 & + \sum_{p_1=0}^{P1-1} \sum_{m_1=0}^{M1} \tilde{h}_{p_1,m_1} |\tilde{x}(n-m_1)|^{p_1} \tilde{x}(n-m_1),
 \end{aligned} \tag{24}$$

onde $P1$ e $P2$ indicam as ordens de truncamento polinomial para as contribuições 1D e 2D, respectivamente, e $M1$ e $M2$ indicam as durações de memória para as contribuições 1D e 2D, respectivamente. Em (24) os fatores de truncamento $P1$ e $M1$ determinam o número de termos da somatória que fornece apenas termos unidimensionais. Os fatores de truncamento $P2$ e $M2$ determinam o número de termos da somatória que fornece apenas os termos bidimensionais. Para garantir isso é imposta a condição $m_2 \neq m_1$. A restrição $p_2 + p_1 < P2$ garante que as contribuições geradas por (24) envolverão, no máximo, o produto de $P2$ informações de envoltória de valor complexo.

Se em (24) os truncamentos dos termos 1D e 2D assumirem valores iguais, ou seja, $P1 = P2 = P$ e $M1 = M2 = M$, então se obtém (20). Isso indica que o modelo descrito por (20) é um caso particular do modelo proposto por (24). Visto de outra forma, o modelo proposto em (24) estende o modelo dado por (20) ao permitir valores diferentes de truncamentos para termos 1D e 2D.

Em princípio, as escolhas dos truncamentos 1D são independentes das escolhas dos truncamentos 2D. Entretanto, a maior vantagem de (24) em relação à (20) está na possibilidade de incluir uma maior proporção de termos 1D em relação a termos 2D. Para explorar essa vantagem, deve-se adotar truncamentos para contribuições 1D maiores, ou pelo menos iguais, aos respectivos 2D, ou seja, $P1 \geq P2$ e $M1 \geq M2$.

Esta modificação permitirá um número maior de modelos comparados com os modelos comportamentais existentes na literatura.

Espera-se que os novos modelos tenham potencial para melhorar o compromisso entre exatidão e quantidade de coeficientes.

A TABELA 3 mostra a quantidade total de coeficientes e dos termos 1D e 2D obtidos por (24), para diferentes valores de truncamentos de ordem polinomial e de duração de memória.

TABELA 3- NÚMERO DE COEFICIENTES GERADOS EM (24).

Truncamentos				Nº de Coeficientes		
P1	M1	P2	M2	Total	1D	2D
3	5	3	5	108	18	90
3	5	2	4	38	18	20
3	5	2	3	30	18	12

FONTE: O AUTOR (2018)

Na TABELA 3 observa-se que, em relação ao total de coeficientes gerados pelo modelo comportamental com truncamentos específicos, na condição em que os truncamentos de ordem polinomial e de duração de memória são, respectivamente, iguais a $P1 = P2 = 3$ e $M1 = M2 = 5$, tem-se 16,67% de termos 1D e 83,33% de termos 2D. Essa condição confirma, através da quantidade total de coeficientes obtidos, e também dos termos 1D e 2D, que (20) é um caso particular de (24), conforme citado anteriormente. Na

segunda situação, onde os valores dos truncamentos são $P1 = 3$, $M1 = 5$, $P2 = 2$ e $M2 = 4$, tem-se 47,37% de termos 1D e 52,63% de termos 2D.

Comparando a TABELA 3 com a TABELA 1, e tomando como exemplo $P1 = 3$, $M1 = 5$, $P2 = 2$ e $M2 = 4$, conclui-se que a proporção de termos 1D aumentou em relação aos termos 2D. A TABELA 4 resume estas duas situações.

TABELA 4 - COMPARAÇÃO ENTRE COEFICIENTES GERADOS EM (20) E (24).

Termos 1D		Termos 2D	
Modelo		Modelo	
em (20)	em (24)	em (20)	em (24)
16,67 %	47,37 %	83,33 %	52,63 %
+ 30,7 %		- 30,7 %	

FONTE: O AUTOR (2018)

A TABELA 4 resume as comparações anteriores da seguinte forma. A quantidade de termos 1D, relativos à quantidade total de termos gerados pelo modelo comportamental descrito por (24), aumentou em 30,7% com a estratégia de truncamentos específicos para diferentes dimensões. A quantidade de termos 2D, relativos à quantidade total de termos gerados pelo modelo, reduz em 30,7%. Ou seja, o ganho na quantidade de termos 1D, em módulo, é igual a redução na quantidade de termos 2D.

3.3 MODELO TRIDIMENSIONAL COM TRUNCAMENTOS ESPECÍFICOS

Ao modelo definido em (23), aqui é aplicada a mesma estratégia do modelo definido em (24). Ou seja, o modelo contém os termos 1D e 2D e inclui os termos 3D, agora com truncamentos de ordem polinomial e de memória específicos para cada dimensão.

Nesse modelo, a inclusão dos termos 3D aumenta a capacidade de modelagem, pois permite a inclusão de termos adicionais 3D, que podem ter uma contribuição significativa na melhoria da exatidão da modelagem, em uma quantidade que pode ser controlada de forma independente das contribuições já presentes nos modelos anteriores, 1D e 2D.

A equação que define este modelo é:

$$\begin{aligned}
\tilde{y}(n) = & \sum_{p_1=1}^{P_3-1} \sum_{p_2=0}^{P_3-1} \sum_{\substack{p_3=0 \\ \text{if } p_3+p_2+p_1 < P_3}}^{P_3-1} \sum_{m_1=0}^{M_3} \sum_{\substack{m_2=0 \\ \text{if } m_3 \neq m_2 \\ \text{if } m_2 \neq m_1 \\ \text{if } m_3 \neq m_1}}^{M_3} \sum_{m_3=0}^{M_3} \tilde{h}_{p_1,p_2,p_3,m_1,m_2,m_3} |\tilde{x}(n - m_1)|^{p_1} \\
& |\tilde{x}(n - m_2)|^{p_2} |\tilde{x}(n - m_3)|^{p_3} \tilde{x}(n - m_3) + \\
& + \sum_{p_1=1}^{P_2-1} \sum_{\substack{p_2=0 \\ \text{if } p_2+p_1 < P_2}}^{P_2-1} \sum_{\substack{m_1=0 \\ \text{if } m_2 \neq m_1}}^{M_2} \sum_{m_2=0}^{M_2} \tilde{h}_{p_1,p_2,m_1,m_2} |\tilde{x}(n - m_1)|^{p_1} |\tilde{x}(n - m_2)|^{p_2} \tilde{x}(n - m_2) + \\
& + \sum_{p_1=0}^{P_1-1} \sum_{m_1=0}^{M_1} \tilde{h}_{p_1 m_1} |\tilde{x}(n - m_1)|^{p_1} \tilde{x}(n - m_1), \tag{25}
\end{aligned}$$

onde P_1 , P_2 e P_3 indicam as ordens de truncamento polinomial para as contribuições 1D, 2D e 3D, respectivamente, e M_1 , M_2 e M_3 indicam as durações de memória para as contribuições 1D, 2D e 3D, respectivamente. Em (25) os fatores de truncamento P_1 e M_1 determinam o número de termos da somatória que fornece apenas termos unidimensionais. Os fatores de truncamento P_2 e M_2 determinam o número de termos da somatória que fornece apenas os termos bidimensionais. Para garantir isso é imposta a condição $m_2 \neq m_1$. Os fatores de truncamento P_3 e M_3 determinam o número de termos da somatória que fornece apenas os termos tridimensionais. Para garantir isso é imposta a condição $m_3 \neq m_2$, $m_2 \neq m_1$ e $m_3 \neq m_1$.

Se em (25) os truncamentos dos termos 1D, 2D e 3D assumirem valores idênticos, ou seja, $P_1 = P_2 = P_3 = P$ e $M_1 = M_2 = M_3 = M$, então se obtém (23). Isso indica que o modelo descrito por (23) é um caso particular do modelo proposto por (25). Em outras palavras, o modelo proposto em (25) estende o modelo dado por (23) ao permitir valores diferentes de truncamentos para termos 1D, 2D e 3D.

Em princípio, as escolhas dos truncamentos 1D são independentes das escolhas dos truncamentos 2D e 3D. Entretanto, a maior vantagem de (25) em relação à (23) está na possibilidade de incluir uma maior proporção de termos 1D em relação a 2D, e termos 2D em relação a 3D. Para explorar essa

vantagem, deve-se adotar truncamentos para contribuições 1D maiores, ou pelo menos iguais aos respectivos 2D, ou seja, $P1 \geq P2$ e $M1 \geq M2$, assim como deve-se adotar truncamentos para contribuições 2D maiores, ou pelo menos iguais aos respectivos 3D, ou seja, $P2 \geq P3$ e $M2 \geq M3$.

A TABELA 5 mostra a comparação entre a quantidade total de coeficientes e dos termos 1D, 2D e 3D obtidos por (25).

TABELA 5 - NÚMERO DE COEFICIENTES GERADOS EM (25).

TRUNCAMENTOS						Nº de Coeficientes			
P1	M1	P2	M2	P3	M3	Total	1D	2D	3D
3	5	3	5	3	5	168	18	90	60
3	5	3	5	3	4	138	18	90	30
3	5	3	5	3	3	120	18	90	12

FONTE: O AUTOR (2018)

Na TABELA 5 observa-se que, em relação ao total de coeficientes gerados pelo modelo comportamental com truncamentos específicos, na condição em que os truncamentos de ordem polinomial e de duração de memória são, respectivamente, iguais a $P1 = P2 = P3 = 3$, e $M1 = M2 = M3 = 5$, tem-se 10,71% de termos 1D, 53,57% de termos 2D e 35,71% de termos 3D. Essa condição confirma, através da quantidade total de coeficientes obtidos, e também dos termos 1D, 2D e 3D, que (23) é um caso particular de (25), conforme citado anteriormente. Na terceira situação, onde os valores dos truncamentos são $P1 = 3$, $M1 = 5$, $P2 = 3$, $M2 = 5$ e $P3 = 3$, $M3 = 3$, tem-se 15% de termos 1D, 75% de termos 2D e 10% de termos 3D.

Comparando a TABELA 5 com a TABELA 2, e tomando como exemplo $P1 = 3$, $M1 = 5$, $P2 = 3$, $M2 = 5$ e $P3 = 3$, $M3 = 3$, conclui-se que a proporção de termos 1D aumentou em relação aos termos 2D, assim como a proporção de termos 2D aumentou em relação aos termos 3D. A TABELA 6 resume estas duas situações.

TABELA 6 - COMPARAÇÃO ENTRE COEFICIENTES GERADOS EM (23) E (25).

Termos 1D		Termos 2D		Termos 3D	
Modelo		Modelo		Modelo	
em (23)	em (25)	em (23)	em (25)	em (23)	em (25)
10,71 %	15 %	53,57 %	75 %	35,71 %	10 %
+ 4,29 %		+ 21,43 %		- 25,71 %	

FONTE: O AUTOR (2018)

A TABELA 6 resume as comparações anteriores da seguinte forma. A quantidade de termos 1D, relativos à quantidade total de termos gerados pelo modelo comportamental descrito por (25), aumentou em 4,29% com a estratégia de truncamentos específicos para diferentes dimensões, enquanto a quantidade de termos 2D, também relativos à quantidade total de termos gerados pelo modelo, aumentou em 21,43% com a estratégia de truncamentos específicos para diferentes dimensões. A quantidade de termos 3D reduz em 25,71%. Ou seja, o ganho na quantidade de termos 1D, em módulo, somado ao ganho na quantidade de termos 2D, é igual a redução na quantidade de termos 3D.

4 VALIDAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

4.1 DESCRIÇÃO DO CENÁRIO PARA VALIDAÇÃO

Nesta seção, são apresentados resultados de aplicação do modelo anterior, descrito por (20), e dos modelos propostos, descritos por (23), (24) e (25), para a modelagem comportamental de APRFs. A base de dados consiste de dois conjuntos de entradas e saídas, obtidos da literatura [22]. Um deles é utilizado para extração dos coeficientes e o outro, para determinar a exatidão da modelagem. Os dados foram obtidos de dois APRFs com características diferentes. O primeiro é um APRF fabricado em tecnologia nitreto de gálio (GaN), com transistor HEMT operando em classe AB. Os sinais de envoltória complexa de entrada e saída deste APRF foram medidos com um analisador vetorial de sinais Rohde & Schwarz FSQ, a uma frequência de amostragem de 30,72 MHz. O sinal aplicado na entrada deste APRF foi uma portadora na frequência de 900 MHz, modulada por uma envoltória 3GPP WCDMA com cerca de 3,84 MHz de largura de banda. O segundo consiste em um modelo de circuito de um APRF na arquitetura Doherty, com transistores HEMT e adequado para fabricação na tecnologia GaN. Para a captura dos dados de entrada e saída deste segundo APRF, simulações de envoltória foram realizadas no simulador *Advanced Design System* (ADS) da Keysight Technologies. Nessas simulações, o APRF foi excitado por um sinal de portadora de frequência 2,14 GHz, modulado por um sinal de envoltória LTE OFDMA com cerca de 10 MHz de largura de banda, e com frequência de amostragem igual a 30,72 MHz. Em ambiente Matlab, os modelos descritos por (20), (23), (24) e (25) foram implementados para diferentes valores de truncamentos de ordem polinomial e memória. Para cada combinação de valores de truncamentos, a extração dos coeficientes foi realizada através do método dos mínimos quadrados (LS) [14], calculada por:

$$\mathbf{H} = (\mathbf{X}^* \mathbf{X})^{-1} \mathbf{X}^* \mathbf{Y}, \quad (26)$$

onde X é a matriz das entradas, Y é o vetor das saídas, H é o vetor dos coeficientes e $()^*$ é o complexo conjugado.

A exatidão da modelagem foi determinada pela métrica do NMSE, apresentada anteriormente por (22). Na determinação do NMSE, para o APRF classe AB foram utilizadas 2001 amostras, e para o APRF Doherty foram utilizadas 4500 amostras.

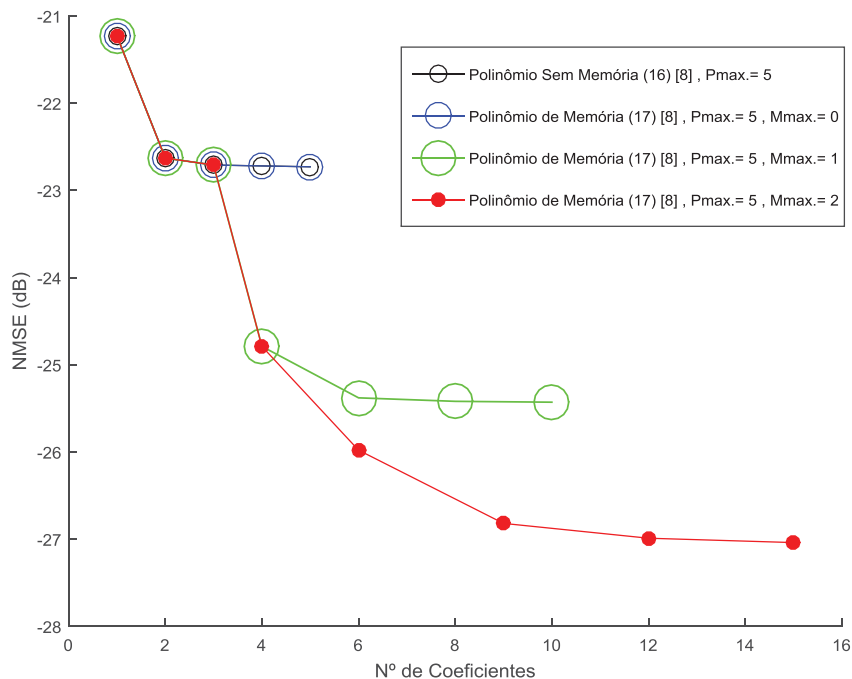
4.2 COMPARAÇÃO DE MODELOS COMPORTAMENTAIS DA LITERATURA

Nesta seção serão apresentadas algumas comparações entre modelos comportamentais existentes na literatura, citados na subseção 2.3.2. O objetivo é mostrar a evolução dos modelos comportamentais através da diferença nos resultados obtidos. Para isso serão utilizados o polinômio sem memória (16) [8], o polinômio de memória (MP) (17) [8] e o polinômio de memória bidimensional completo (20) [10].

O polinômio sem memória definido em (16) tem as mesmas características em toda a banda de frequências de operação, o que é uma boa aproximação para sinais de banda estreita. No entanto, um APRF real tem memória e suas características dependem da frequência do sinal. Ter memória significa que a saída do APRF não é função apenas da entrada atual, mas também uma função das entradas e saídas passadas. A medida que a largura de banda do sinal aumenta, os efeitos de memória no APRF tornam-se evidentes [8].

Na FIGURA 14 é mostrada uma comparação para diferentes combinações dos valores dos truncamentos de ordem polinomial e de duração de memória, mantendo-se o valor do truncamento de ordem polinomial e variando-se a duração de memória. Pode-se observar que o aumento da duração de memória produz um maior número de coeficientes e melhora na exatidão. Fazendo $M = 0$ em (17), conclui-se que o polinômio sem memória (16) é um caso particular de (17). A conclusão, citada em [8], e reforçada aqui, é que polinômios com memória são essenciais para sistemas banda larga.

FIGURA 14 – COMPARAÇÃO DO NMSE EM FUNÇÃO DO NÚMERO DE COEFICIENTES ENTRE MODELOS EXISTENTES NA LITERATURA



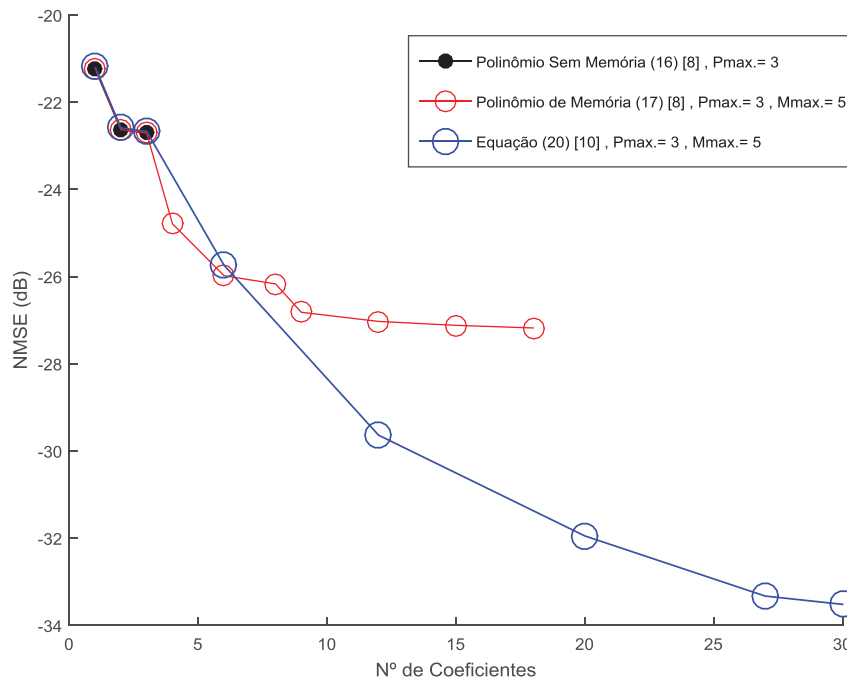
FONTE: O AUTOR (2018)

A próxima comparação entre os modelos existentes na literatura é apresentada na FIGURA 15 com a inclusão do modelo bidimensional completo (20) [10].

Já citado na subseção 2.3.2, o polinômio de memória (17) produz apenas termos unidimensionais (1D). Com a inclusão dos termos bidimensionais, haverá aumento no número de coeficientes, e o resultado esperado é a melhoria na exatidão. Na FIGURA 15 é possível observar e concluir que, para mesma ordem polinomial e duração de memória, os resultados dos três modelos comprovam as expectativas. Ou seja, o modelo bidimensional apresenta exatidão maior que os modelos anteriores.

Nesta comparação é possível apontar outro fator importante, e desejável na modelagem comportamental, que é a possibilidade dos modelos serem mais exatos com um número menor de coeficientes.

FIGURA 15 – COMPARAÇÃO DO NMSE EM FUNÇÃO DO NÚMERO DE COEFICIENTES PARA MODELOS EXISTENTES NA LITERATURA



FONTE: O AUTOR (2018)

4.3 RESULTADOS PARA O APRF GAN HEMT CLASSE AB

4.3.1 Definição dos Truncamentos de Ordem Polinomial e Duração de Memória.

O cenário ideal para ordem polinomial e duração memória são, respectivamente, $P = \infty$ e $M = \infty$.

A quantidade de coeficientes é fortemente condicionada à ordem de truncamento polinomial e à duração da memória. Desta forma, a condição ideal é impossível de ser aplicada.

Para definição de valores finitos parte-se da premissa que, sendo o APRF um sistema não linear, é conveniente escolher para ordem polinomial no mínimo $P = 3$. Para duração de memória, considerando que os modelos propostos neste trabalho serão bidimensionais e tridimensionais, e comparados com modelo anterior existente na literatura, também bidimensional, não faz sentido escolher valores menores que $M = 2$ para os bidimensionais e menores que $M = 3$ para os tridimensionais. Simulações abaixo desses limites para os

truncamentos impediriam que fossem gerados os termos nas respectivas dimensões em cada um dos modelos.

Assim, os valores máximos de truncamentos foram escolhidos após uma análise prévia dos dados, que indicou uma presença mais acentuada de efeitos de memória em relação aos efeitos não lineares. As tabelas 7 e 8 mostram os resultados que levaram a escolha dos valores máximos da ordem polinomial e duração de memória e as figuras 16, 17, 18 e 19 complementam os resultados apresentados nas tabelas.

TABELA 7 - ESCOLHA DOS TRUNCAMENTOS PARA OS MODELOS 2D.

Equação (20)	Nº de Coeficientes	NMSE (dB)
P = 3 M = 5	108	-39,50
P = 5 M = 3	140	-38,02

FONTE: O AUTOR (2018)

TABELA 8 - ESCOLHA DOS TRUNCAMENTOS PARA OS MODELOS 3D.

Equação (23)	Nº de Coeficientes	NMSE (dB)
P = 3 M = 5	168	-39,47
P = 5 M = 3	260	-37,91

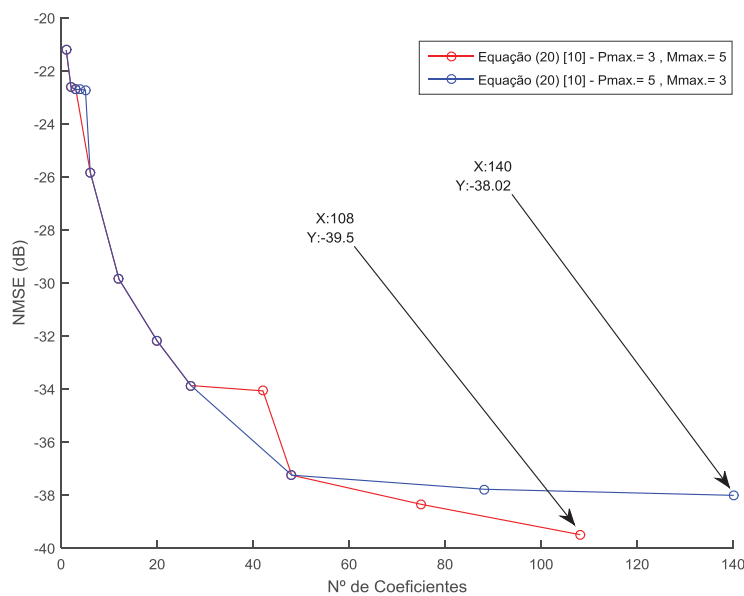
FONTE: O AUTOR (2018)

Através das tabelas 7 e 8, para este primeiro APRF, pode-se observar que apesar de um maior número de coeficientes obtidos para valores dos truncamentos $P = 5$ e $M = 3$, as melhores exatidões tanto para o modelo 2D completo definido em (20) como para o modelo 3D completo definido em (23) foram obtidas para valores dos truncamentos $P = 3$ e $M = 5$.

Na FIGURA 16 pode-se observar os resultados para maior quantidade de modelos gerados, variando os truncamentos de ordem polinomial e duração de memória de seus valores mínimos até seus valores máximos, indicados na TABELA 7. Ou seja, obtém-se melhor exatidão para os modelos com valor do truncamento de ordem polinomial menor que o valor do truncamento de duração de memória.

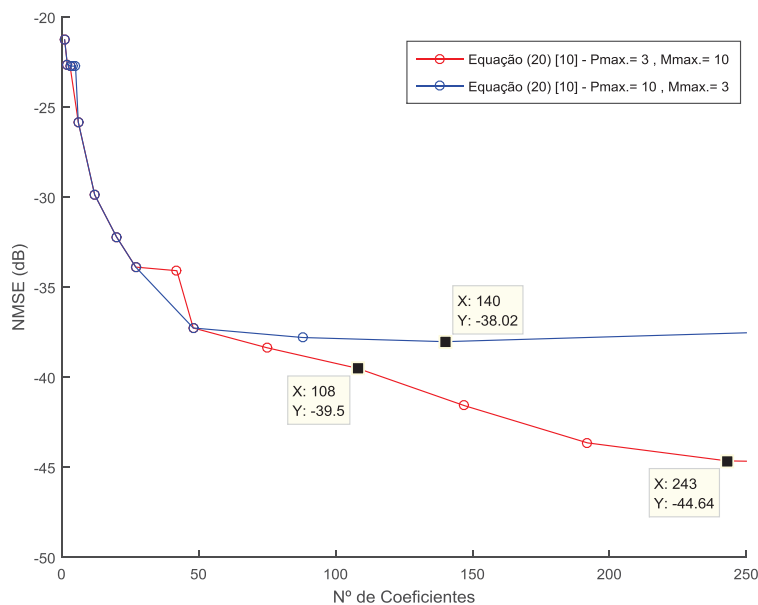
Na FIGURA 17 é apresentada uma segunda simulação, onde os valores máximos para os truncamentos de ordem polinomial e de duração de memória são superiores aos apresentados na FIGURA 16. Mais uma vez pode ser observado que o aumento da duração de memória é mais eficiente para a exatidão do modelo comportamental nesse APRF. Também é possível observar, comparando os resultados das figuras 16 e 17, que para valores maiores de duração de memória a exatidão melhora. Na FIGURA 17 estão mostrados os NMSEs obtidos para os valores máximos de truncamentos da TABELA 7. Além destes foi incluído o NMSE para 243 coeficientes que mostra uma significativa melhora na exatidão.

FIGURA 16 – NMSE EM FUNÇÃO DO NÚMERO DE COEFICIENTES PARA VALORES MÁXIMOS DE TRUNCAMENTOS $P_{max}=3$ E $M_{max}=5$, $P_{max}=5$ E $M_{max}=3$ UTILIZANDO O MODELO 2D (20) [10]



FONTE: O AUTOR (2018)

FIGURA 17 – NMSE EM FUNÇÃO DO NÚMERO DE COEFICIENTES PARA VALORES MÁXIMOS DE TRUNCAMENTOS $P_{max}=3$ E $M_{max}=10$, $P_{max}=10$ E $M_{max}=3$ UTILIZANDO O MODELO 2D (20) [10]

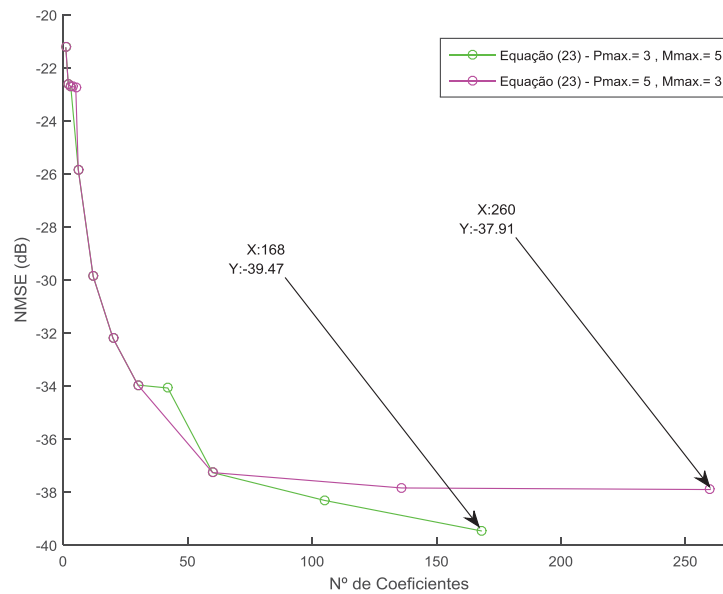


FONTE: O AUTOR (2018)

De forma similar ao procedimento para o modelo 2D completo, na FIGURA 18 pode-se observar os resultados para maior quantidade de modelos gerados, variando os truncamentos de ordem polinomial e duração de memória de seus valores mínimos até seus valores máximos, indicados na TABELA 8, para o modelo 3D completo. Ou seja, obtém-se melhor exatidão para os modelos com valor do truncamento de ordem polinomial menor que o valor do truncamento de duração de memória.

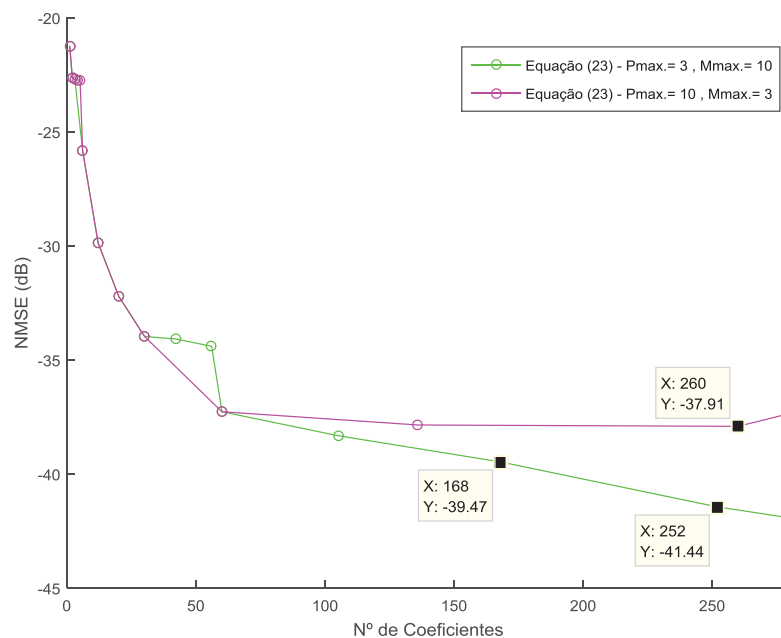
Na FIGURA 19 é apresentada uma segunda simulação, onde os valores máximos para os truncamentos de ordem polinomial e de duração de memória são superiores aos apresentados na FIGURA 18. A conclusão é que o aumento da duração de memória é mais eficiente para a exatidão do modelo comportamental nesse APRF. Também é possível observar, comparando os resultados das figuras 18 e 19, que para valores maiores de duração de memória a exatidão melhora. Na FIGURA 19 estão mostrados os NMSEs obtidos para os valores máximos de truncamentos da TABELA 8, e incluído o NMSE para 252 coeficientes, que mostra uma significativa melhora na exatidão.

FIGURA 18 – NMSE EM FUNÇÃO DO NÚMERO DE COEFICIENTES PARA VALORES MÁXIMOS DE TRUNCAMENTOS $P_{max}=3$ E $M_{max}=5$, $P_{max}=5$ E $M_{max}=3$ UTILIZANDO O MODELO 3D (23)



FONTE: O AUTOR (2018)

FIGURA 19 – NMSE EM FUNÇÃO DO NÚMERO DE COEFICIENTES PARA VALORES MÁXIMOS DE TRUNCAMENTOS $P_{max}=3$ E $M_{max}=10$, $P_{max}=10$ E $M_{max}=3$ UTILIZANDO O MODELO 3D (23)



FONTE: O AUTOR (2018)

Com base nessa análise, os truncamentos de ordem polinomial P de (20), assim como os truncamentos P_1 e P_2 de (24) e P_1 , P_2 e P_3 de (25) foram

variados entre seus valores mínimos até 3. Os truncamentos M de (20), assim como os truncamentos $M1$ e $M2$ de (24) e $M1$, $M2$ e $M3$ de (25) foram variados entre seus valores mínimos até 5.

4.3.2 Resultados para os Modelos Bidimensional Completo e Tridimensional Completo com Restrições nos Truncamentos.

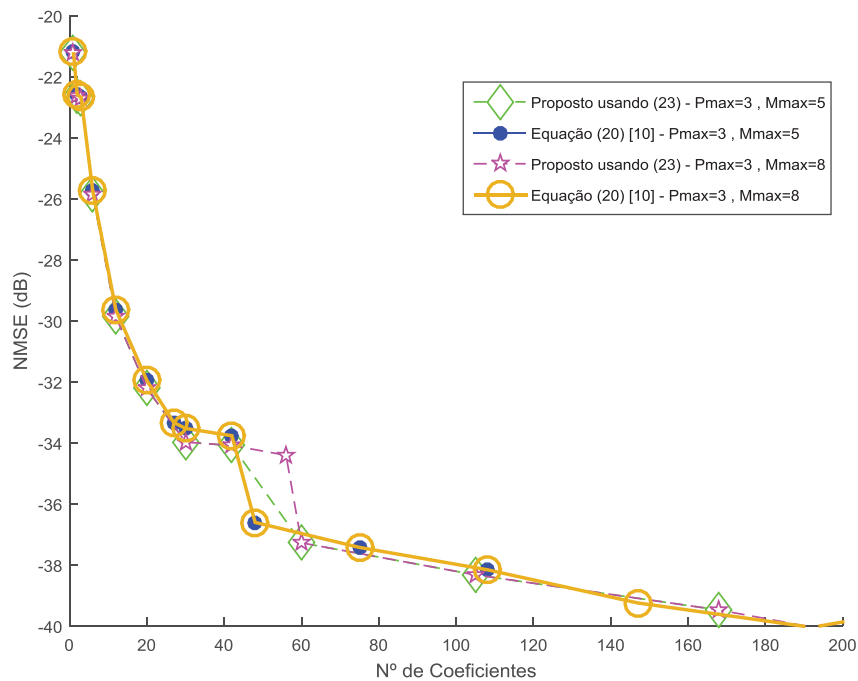
Aqui será apresentada a comparação entre o modelo anterior definido por (20) e o modelo comportamental tridimensional completo, proposto por (23).

Os modelos bidimensional e tridimensional completos incluem, respectivamente, todos os termos 1D e 2D e todos os termos 1D, 2D e 3D.

A FIGURA 20 mostra os resultados obtidos para o NMSE em função do número de coeficientes para diferentes combinações de valores de truncamentos de ordem polinomial e duração de memória. Considerando o modelo (20) existente na literatura [10] como referência nesta análise, observa-se que o modelo proposto por (23) não apresenta melhoria significativa na exatidão, mesmo com o aumento da duração de memória. Resumindo, os resultados para todas as simulações apresentadas na FIGURA 20 são praticamente iguais.

Desta forma, espera-se que a extensão do modelo 3D dado por (23) para um modelo com truncamentos específicos obtenha melhores resultados para a exatidão.

FIGURA 20 - NMSE EM FUNÇÃO DO NÚMERO DE COEFICIENTES PARA OS MODELOS 2D COMPLETO (20) [10] E 3D COMPLETO (23)



FONTE: O AUTOR (2018)

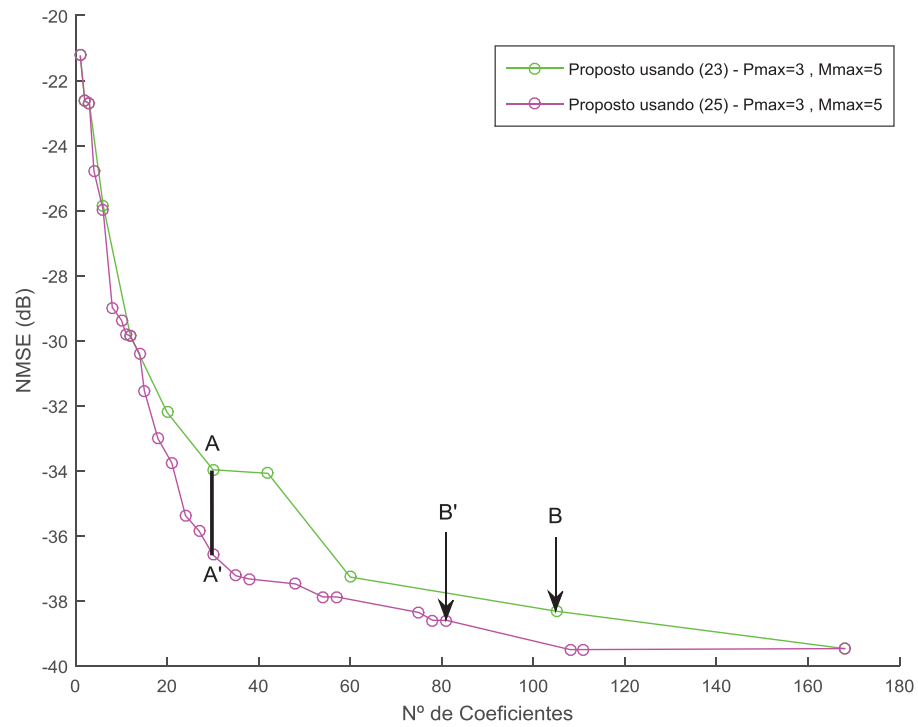
4.3.3 Resultados para os Modelos Tridimensional Completo e Tridimensional com Truncamentos Específicos e Restrições nos Truncamentos.

Aplicando a estratégia de truncamentos específicos para as diferentes dimensões no modelo proposto por (23), obtém-se o modelo definido em (25). A FIGURA 21 mostra os resultados entre o NMSE e o número de coeficientes para os dois modelos aqui citados.

A estratégia proposta apresentou resultados melhores na exatidão do modelo. Ou seja, garantir uma maior proporção de termos 1D em relação a 2D, e termos 2D em relação a 3D.

Dois pontos apresentados na FIGURA 21 demonstram isso. O primeiro é para 30 coeficientes (A – A'), onde houve uma melhoria na exatidão de 2,62 dB. A segunda situação é para 81 coeficientes (B'), obtido por (25), e 105 coeficientes (B), obtido por (23). Houve uma redução de 24 coeficientes com pequena melhoria no NMSE.

FIGURA 21 - NMSE EM FUNÇÃO DO NÚMERO DE COEFICIENTES PARA OS MODELOS 3D COMPLETO (23) E 3D COM TRUNCAMENTOS ESPECÍFICOS (25)

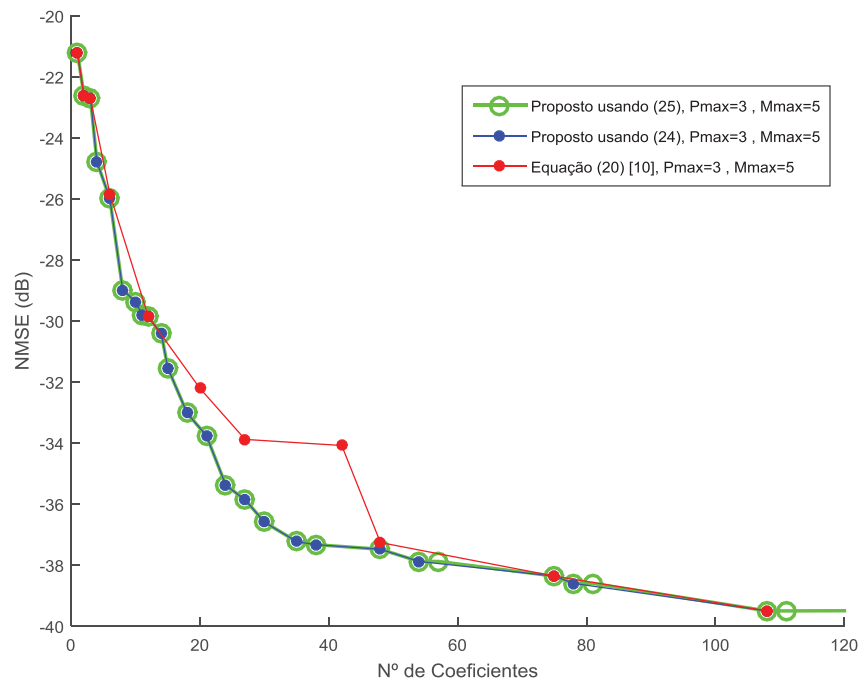


FONTE: O AUTOR (2018)

4.3.4 Resultados para o Modelo Anterior e Propostos 2D e 3D com Restrições nos Truncamentos.

Os resultados obtidos para o NMSE em função do número de coeficientes estão mostrados na FIGURA 22 e comentados a seguir.

FIGURA 22 - NMSE EM FUNÇÃO DO NÚMERO DE COEFICIENTES PARA OS MODELOS 2D COMPLETO, 2D E 3D PROPOSTOS



FONTE: O AUTOR (2018)

A FIGURA 22 mostra melhoria na exatidão do modelo proposto usando (24) comparado com o modelo da literatura [10] apresentado em (20). Com as restrições impostas, $P_1 \geq P_2$, $P_2 \geq P_3$, $M_1 \geq M_2$ e $M_2 \geq M_3$, o modelo 3D proposto usando (25) não apresentou melhoria alguma na exatidão comparado ao modelo proposto usando (24). Na FIGURA 22 a curva referente ao modelo descrito por (24) está sobreposta pelo modelo descrito por (25).

Para melhor constatar esta situação, na TABELA 9 estão apresentados todos os valores para os NMSEs dos dois modelos. Na TABELA 10, estão apresentados os resultados parciais para o NMSE, obtidos por (24) e por (25), com os respectivos truncamentos de ordem polinomial e duração de memória. Modelos com mesmo NMSE foram descartados para simplificar a TABELA 10. Também constam nesta tabela alguns modelos gerados por (25) que não são gerados por (24). Isto demonstra que, quando P_3 e M_3 são diferentes de zero, aparecem modelos não gerados pelo modelo bidimensional. Porém, isto não implica que nestes casos o valor do erro será menor. Por exemplo, para 30 coeficientes, na TABELA 10, verifica-se que o erro para o modelo 3D é maior que para o modelo 2D, razão pela qual este ponto não aparece no gráfico da FIGURA 22.

De fato, quando $P_3 = M_3 = 0$, $P_1 = P_2$ e $M_1 = M_2$ em ambos os modelos, os resultados para o número de coeficientes e NMSE são iguais.

Concluindo esta análise, observa-se que dentro da mesma faixa de coeficientes, ou seja, onde existem modelos gerados por (24) e por (25), aumentar a proporção de termos 1D em relação a 2D, e de termos 2D em relação a 3D, não trouxe nenhuma redução no erro pelo modelo 3D em relação ao modelo bidimensional definido por (20).

TABELA 9- COMPARAÇÃO ENTRE OS MELHORES NMSEs EM (24) E (25).

Modelo 2D (24)			Modelo 3D (25)	
Nº Coef.	NMSE (dB)		Nº Coef.	NMSE (dB)
1	-21,23		1	-21,23
2	-22,63		2	-22,63
3	-22,71		3	-22,71
4	-24,79		4	-24,79
6	-25,98		6	-25,98
8	-28,98		8	-28,98
10	-29,37		10	-29,37
11	-29,79		11	-29,79
12	-29,87		12	-29,87
14	-30,42		14	-30,42
15	-31,54		15	-31,54
18	-33,02		18	-33,02
21	-33,76		21	-33,76
24	-35,38		24	-35,38
27	-35,86		27	-35,86
30	-36,59		30	-36,59
35	-37,23		35	-37,23
38	-37,33		38	-37,33
48	-37,48		48	-37,48
54	-37,88		54	-37,88
75	-38,36		75	-38,36
78	-38,6		78	-38,6
108	-39,5		108	-39,5
			168	-39,47

FONTE: O AUTOR (2018)

TABELA 10- COMPARAÇÃO ENTRE OS NMSEs OBTIDOS EM (24) E (25).

Modelo 2D (24)						Modelo 3D (25)							
P1	M1	P2	M2	Nº Coef.	NMSE (dB)	P1	M1	P2	M2	P3	M3	Nº Coef.	NMSE (dB)
1	0	0	0	1	-21,23	1	0	0	0	0	0	1	-21,23
2	3	2	2	14	-30,31	2	3	2	2	0	0	14	-30,31
3	2	3	2	27	-33,88	3	2	3	2	0	0	27	-33,88
						3	2	3	2	3	2	30	-33,97
3	3	2	3	24	-35,38	3	3	2	3	0	0	24	-35,38
3	3	3	2	30	-34,91	3	3	3	2	0	0	30	-34,91
3	3	3	3	48	-37,26	3	3	3	3	0	0	48	-37,26
						3	3	3	3	3	3	60	-37,27
3	4	3	4	75	-38,36	3	4	3	4	0	0	75	-38,36
3	5	3	2	36	-35,96	3	5	3	2	0	0	36	-35,96
3	5	3	4	78	-38,6	3	5	3	4	0	0	78	-38,6
3	5	3	5	108	-39,5	3	5	3	5	0	0	108	-39,5

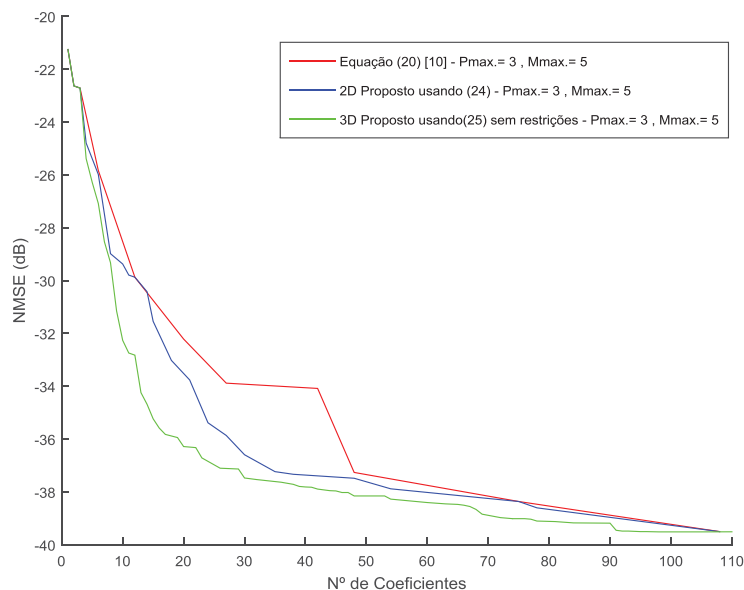
FONTE: O AUTOR (2018)

Com base na análise anterior, investigou-se melhor o modelo comportamental tridimensional e, após algumas simulações, concluiu-se que, se não forem utilizadas as imposições $P1 \geq P2$, $P2 \geq P3$, $M1 \geq M2$ e $M2 \geq M3$, o resultado para o modelo 3D usando (25) apresenta melhores resultados na exatidão. Os resultados para essa condição estão detalhados na subseção 4.3.5. Na subseção 4.3.6, de forma semelhante, foram retiradas as restrições $P1 \geq P2$ e $M1 \geq M2$ do modelo usando (24) e comparado com seus resultados apresentados em 4.3.5.

4.3.5 Resultados para o Modelo Anterior e Modelos Propostos 2D com Restrições e 3D sem Restrições nos Truncamentos.

Aqui foram retiradas do código do modelo tridimensional as restrições entre os parâmetros de ordem polinomial $P1$, $P2$ e $P3$, e duração de memória $M1$, $M2$ e $M3$. Para o modelo bidimensional foram mantidas as restrições $P1 \geq P2$ e $M1 \geq M2$. Os valores adotados para os truncamentos de ordem polinomial e duração de memória foram os mesmos utilizados na subseção 4.3.1. Os resultados obtidos estão indicados nas figuras 23 a 30 e nas tabelas 11 e 12, comentados na sequência.

FIGURA 23 - NMSE EM FUNÇÃO DO NÚMERO DE COEFICIENTES SEM RESTRIÇÕES NOS TRUNCAMENTOS DO MODELO 3D



FONTE: O AUTOR (2018)

Observando o gráfico da FIGURA 23 é possível verificar que o modelo tridimensional, nestas novas condições de simulação, apresentou melhoria no erro. Isso significa que garantir um número maior de termos 1D em relação aos 2D e 2D em relação aos 3D não melhora a exatidão do modelo. De outra forma, as contribuições dos termos 3D são significativas para melhores resultados no erro de modelagem.

Dois cenários de comparação serão utilizados para verificação da exatidão e da quantidade de coeficientes.

No primeiro caso serão verificados os modelos mais exatos com a mesma quantidade de coeficientes e, no segundo caso, para modelos com a mesma exatidão será verificado qual modelo possui o menor número de coeficientes.

A TABELA 11 e as figuras 24 a 27 apresentam os resultados para a primeira comparação.

As letras identificadas na TABELA 11 estão indicadas nas figuras 24 a 27. Cada figura apresenta um único caso da TABELA 11.

Os pontos A, A' e A'', estão mostrados na FIGURA 24. Este caso mostra que para 12 coeficientes os modelos 2D definido por (20) e por (24) possuem a mesma exatidão. Porém, o modelo 3D definido por (25) para esse

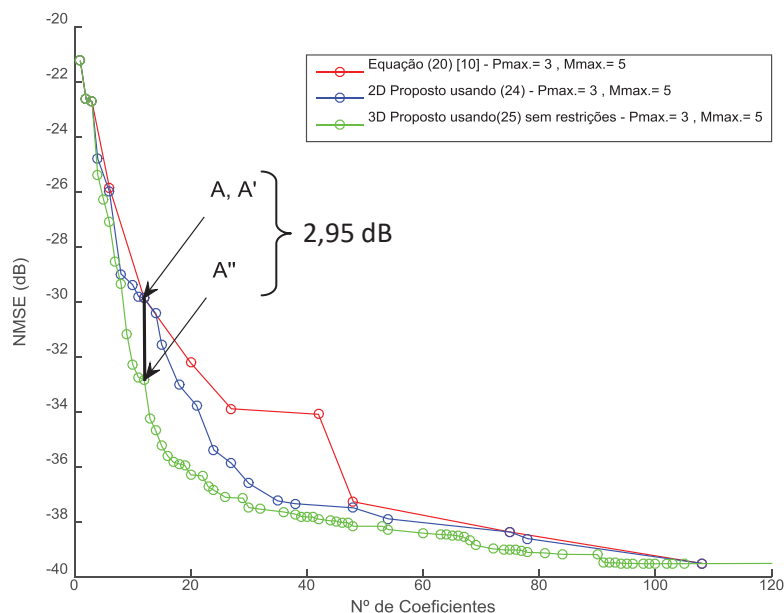
mesmo número de coeficientes apresenta uma redução no erro de 2,95 dB. Outro ponto que vale a pena ressaltar é para 42 coeficientes. Os fatores de truncamentos para o modelo definido por (24) não geram modelo, mas a redução no erro comparando o modelo 2D de (20) e o modelo proposto por (25) é de 3,81 dB.

TABELA 11 - COMPARAÇÃO ENTRE OS NMSEs OBTIDOS POR (24) E (25) PARA O MESMO NÚMERO DE COEFICIENTES.

Nº de Coeficientes	Modelo 2D (20)	Ganho no Erro (dB)	Modelo 2D (24)	Ganho no Erro (dB)	Modelo 3D (25)
	NMSE (dB)		NMSE (dB)		NMSE (dB)
12	-29,87 (A)		-29,87 (A')	2,95	-32,82 (A'')
20	-32,21 (B)	1,55		2,52	-36,28 (B'')
21			-33,76 (B')		
26					-37,1 (C'')
27	-33,88 (C)	1,98	-35,86 (C')	1,24	
42	-34,08 (D)			3,81	-37,89 (D'')

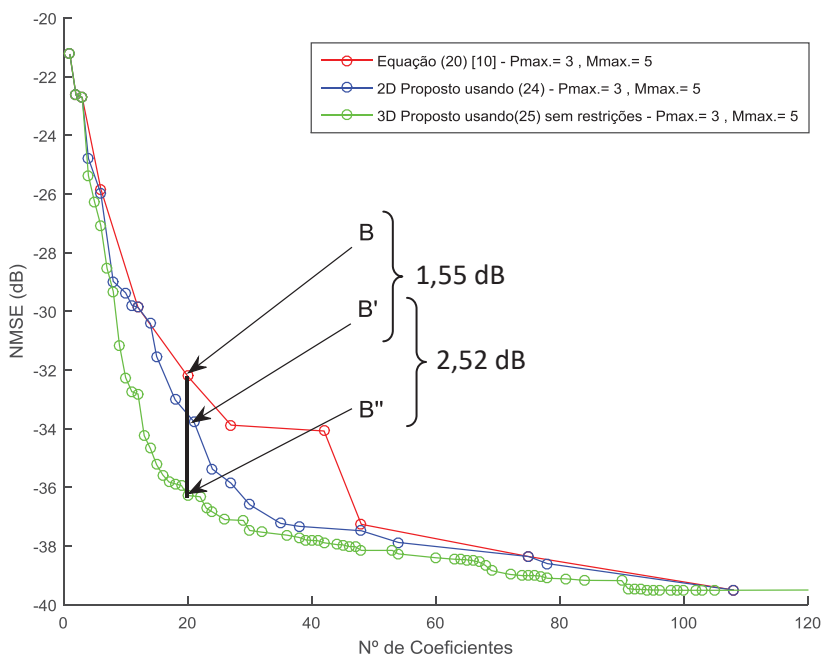
FONTE: O AUTOR (2018)

FIGURA 24 – COMPARAÇÃO ENTRE OS MODELOS 2D (20), 2D (24) E SEM RESTRIÇÕES NOS TRUNCAMENTOS PARA O MODELO 3D (25) – PONTOS A, A', A" DA TABELA 11



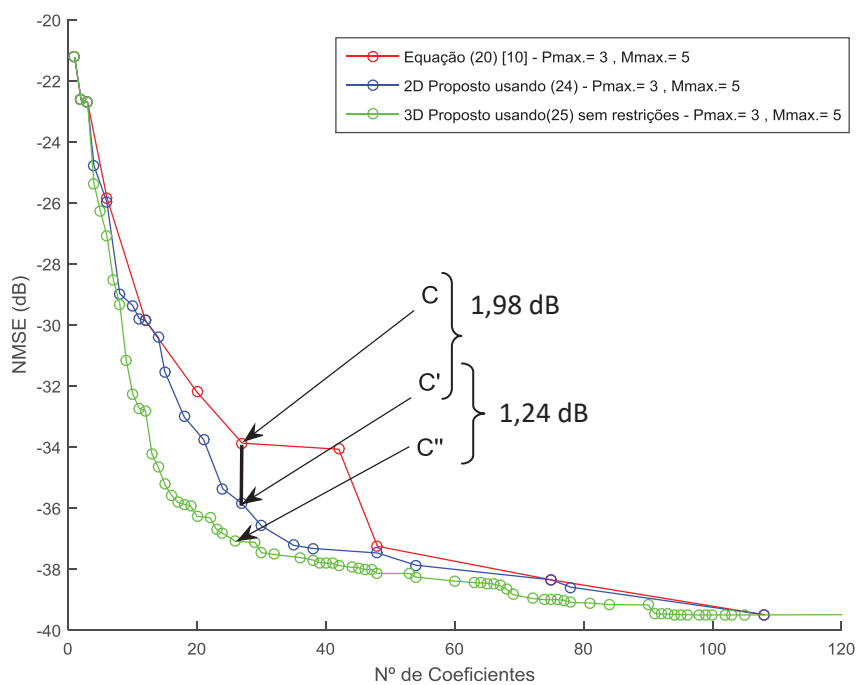
FONTE: O AUTOR (2018)

FIGURA 25 - COMPARAÇÃO ENTRE OS MODELOS 2D (20), 2D (24) E SEM RESTRIÇÕES NOS TRUNCAMENTOS PARA O MODELO 3D (25) – PONTOS B, B', B'' DA TABELA 11



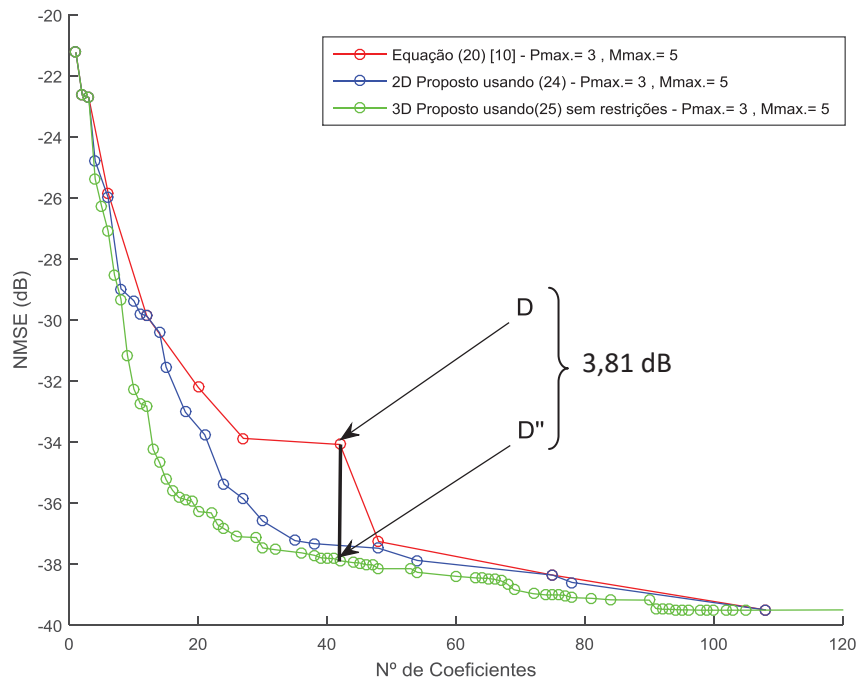
FONTE: O AUTOR (2018)

FIGURA 26 - COMPARAÇÃO ENTRE OS MODELOS 2D (20), 2D (24) E SEM RESTRIÇÕES NOS TRUNCAMENTOS PARA O MODELO 3D (25) – PONTOS C, C', C'' DA TABELA 11



FONTE: O AUTOR (2018)

FIGURA 27 - COMPARAÇÃO ENTRE OS MODELOS 2D (20), 2D (24) E SEM RESTRIÇÕES NOS TRUNCAMENTOS PARA O MODELO 3D (25) – PONTOS D, D" DA TABELA 11



FONTA: O AUTOR (2018)

A próxima análise compara o número de coeficientes para modelos com o mesmo NMSE. A TABELA 12 e as figuras 28 a 30 apresentam os resultados para essa análise.

Da mesma forma que na primeira análise, cada figura representa um caso específico de número de coeficiente para o mesmo NMSE.

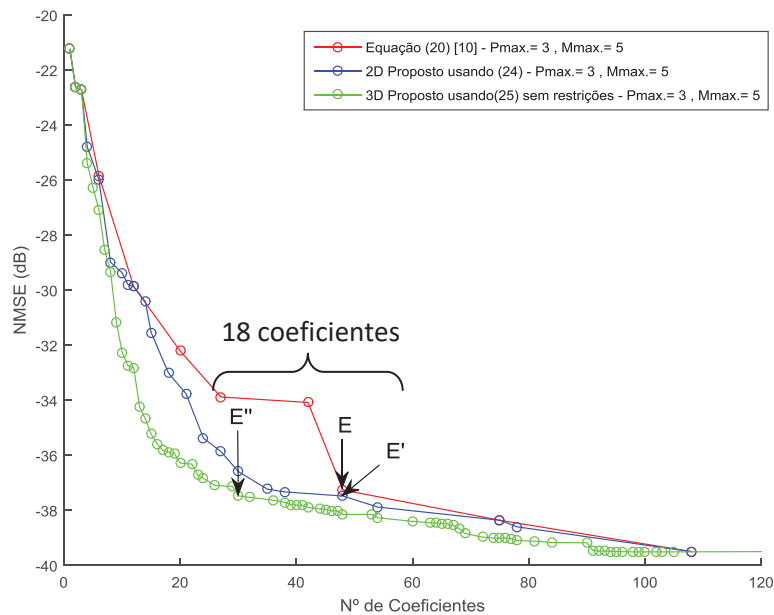
Citando um dos casos da TABELA 12, tem-se para os pontos F' e F'' uma redução de 15 coeficientes, sendo que o NMSE para F'' já apresenta uma pequena melhoria. As diferenças no número de coeficientes para os demais casos estão apresentadas nas respectivas figuras.

TABELA 12- COMPARAÇÃO ENTRE OS NÚMEROS DE COEFICIENTES PARA O MESMO NMSE OBTIDOS POR (24) E (25).

Nº de Coeficientes	Modelo 2D (20)	Modelo 2D (24)	Modelo 3D (25)
	NMSE (dB)	NMSE (dB)	NMSE (dB)
30			-37,47 (E'')
48	-37,26 (E)	-37,48 (E')	
60			-38,4 (F'')
75		-38,36 (F')	
95			-39,5 (G'')
108		-39,5 (G')	

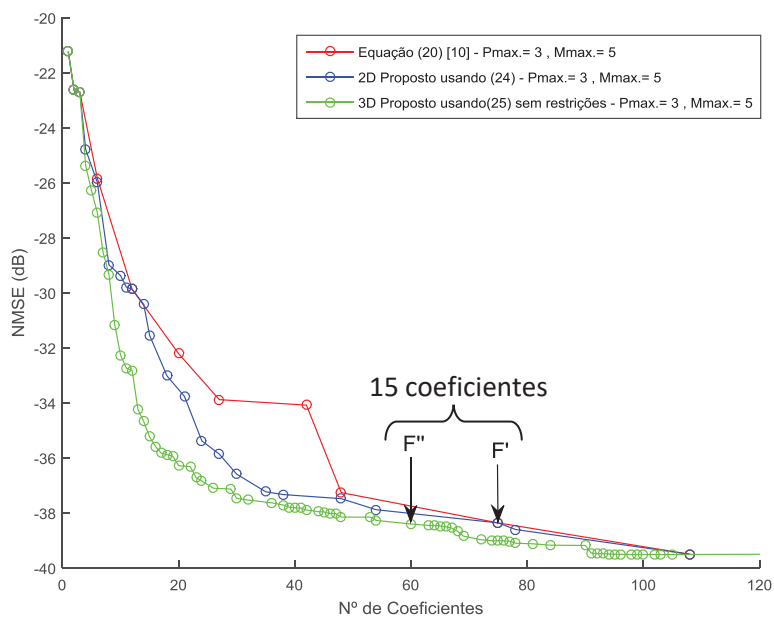
FONTE: O AUTOR (2018)

FIGURA 28 - COMPARAÇÃO ENTRE OS MODELOS 2D (20), 2D (24) E SEM RESTRIÇÕES NOS TRUNCAMENTOS PARA O MODELO 3D (25) – PONTOS E, E', E'' DA TABELA 12



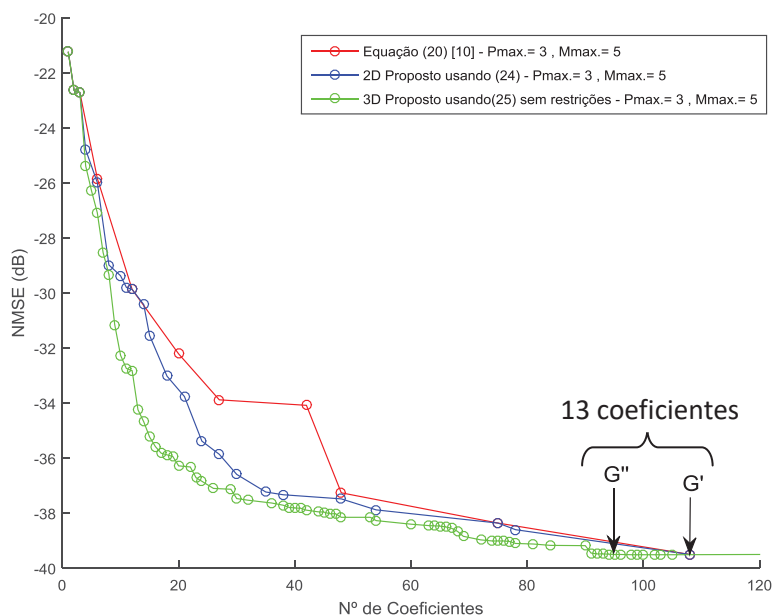
FONTE: O AUTOR (2018)

FIGURA 29 - COMPARAÇÃO ENTRE OS MODELOS 2D (20), 2D (24) E SEM RESTRIÇÕES NOS TRUNCAMENTOS PARA O MODELO 3D (25) – PONTOS F', F'' DA TABELA 12



FONTE: O AUTOR (2018)

FIGURA 30 - COMPARAÇÃO ENTRE OS MODELOS 2D (20), 2D (24) E SEM RESTRIÇÕES NOS TRUNCAMENTOS PARA O MODELO 3D (25) – PONTOS G', G'' DA TABELA 12



FONTE: O AUTOR (2018)

4.3.6 Resultados para o Modelo Proposto 2D sem Restrições nos Truncamentos.

A motivação para esta análise surgiu da verificação de que, para o modelo 3D proposto por (25), houve melhoria na exatidão do modelo quando não foi imposta a condição de aumentar a proporção dos termos 1D em relação aos termos 2D e dos termos 2D em relação aos termos 3D. Da mesma forma, aqui não será garantido aumentar a proporção dos termos 1D em relação aos termos 2D no modelo definido por (24).

Na análise dos resultados será dada ênfase na comparação da melhoria da exatidão do modelo 2D proposto em (24).

Os valores para os truncamentos de ordem polinomial e duração de memória foram os mesmos utilizados na subseção 4.3.1 e os resultados obtidos estão indicados nas figuras 31 a 33, complementados com a TABELA 13, e comentados na sequência.

Para os pontos A e A' o erro teve uma redução de 1,49 dB entre os resultados do modelo 2D de (24) com e sem restrições.

Os demais resultados na TABELA 13 estão apresentados individualmente em cada figura.

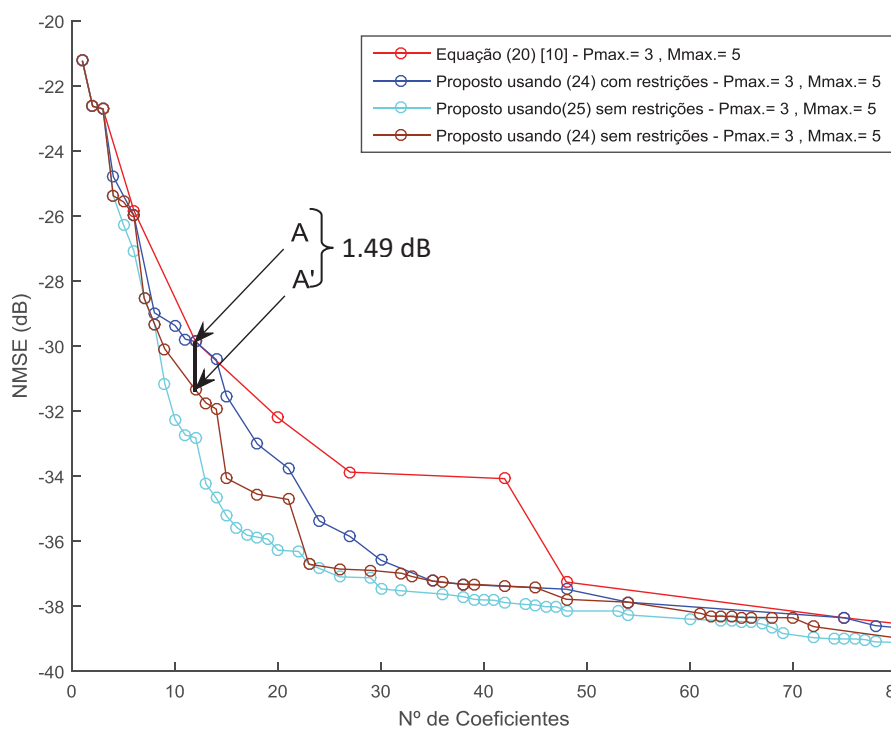
A coluna referente ao modelo 3D de (25) consta na tabela apenas para confirmar o que já foi mencionado anteriormente. Ou seja, sua exatidão é melhor que as duas situações do modelo bidimensional de (24) apresentadas na TABELA 13 e mostrada nas figuras 31 a 33.

TABELA 13- COMPARAÇÃO ENTRE OS NMSEs OBTIDOS POR (24) E (25) PARA O MESMO NÚMERO DE COEFICIENTES.

Nº de Coeficientes	Modelo 2D (24) FIGURA 16	Ganho no Erro (dB)	Modelo 2D (24) FIGURA 17	Modelo 3D (25) FIGURA 16
	NMSE (dB)		NMSE (dB)	NMSE (dB)
12	-29,87 (A)	1,49	-31,36 (A')	-32,82 (A'')
18	-33,02 (B)	1,54	-34,56 (B')	-35,88 (B'')
26		2,98	-36,86 (C')	-37,1 (C'')
27	-33,88 (C)			

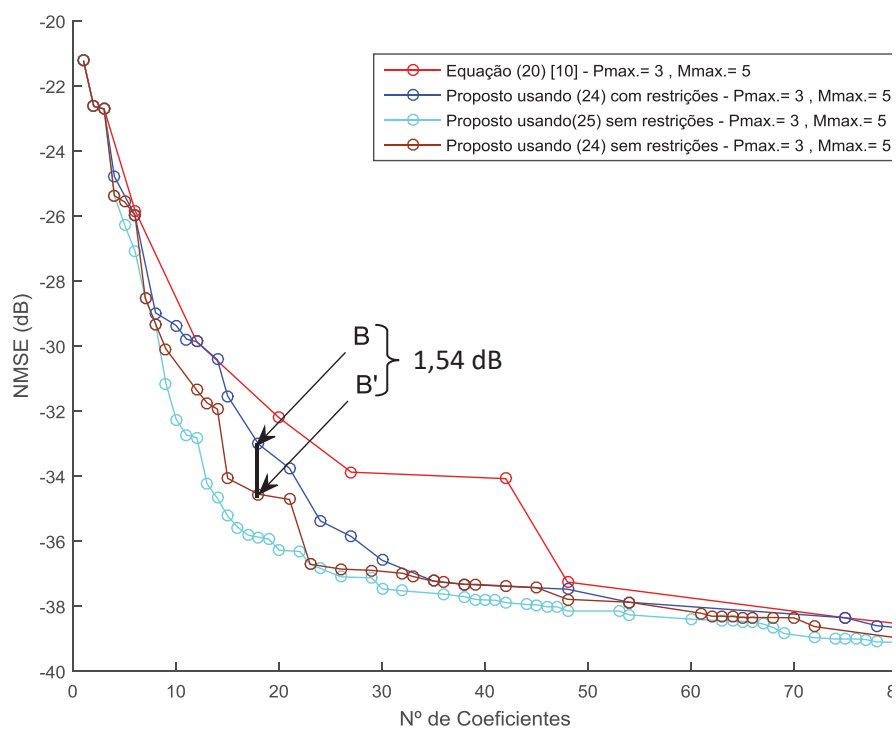
FONTE: O AUTOR (2018)

FIGURA 31 - COMPARAÇÃO ENTRE OS MODELOS 2D (20) E SEM RESTRIÇÕES NOS TRUNCAMENTOS PARA OS MODELOS 2D (24) E 3D (25) – PONTOS A, A' DA TABELA 13



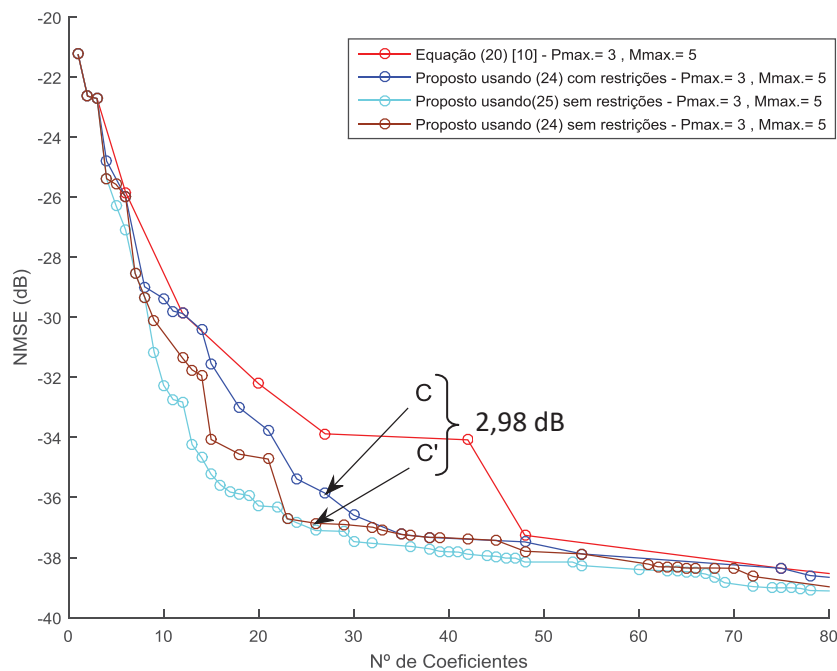
FONTE: O AUTOR (2018)

FIGURA 32 - COMPARAÇÃO ENTRE OS MODELOS 2D (20) E SEM RESTRIÇÕES NOS TRUNCAMENTOS PARA OS MODELOS 2D (24) E 3D (25) – PONTOS B, B' DA TABELA 13



FONTE: O AUTOR (2018)

FIGURA 33 - COMPARAÇÃO ENTRE OS MODELOS 2D (20) E SEM RESTRIÇÕES NOS TRUNCAMENTOS PARA OS MODELOS 2D (24) E 3D (25) – PONTOS C, C' DA TABELA 13



FONTE: O AUTOR (2018)

Nesta nova simulação o modelo 2D (24) também apresentou melhorias no erro, comparando com os seus resultados na TABELA 12.

Garantir um número maior de termos 1D em relação aos 2D trouxe melhorias quando o modelo de (24) é comparado com o modelo de (20). Porém, não aumentar os termos 1D em relação aos termos 2D trouxe um ganho adicional na redução do erro de modelagem e, dessa forma, melhorou mais a exatidão em relação ao modelo de (20). Para alguns modelos gerados por (24), a exatidão se aproximou do novo modelo 3D de (25).

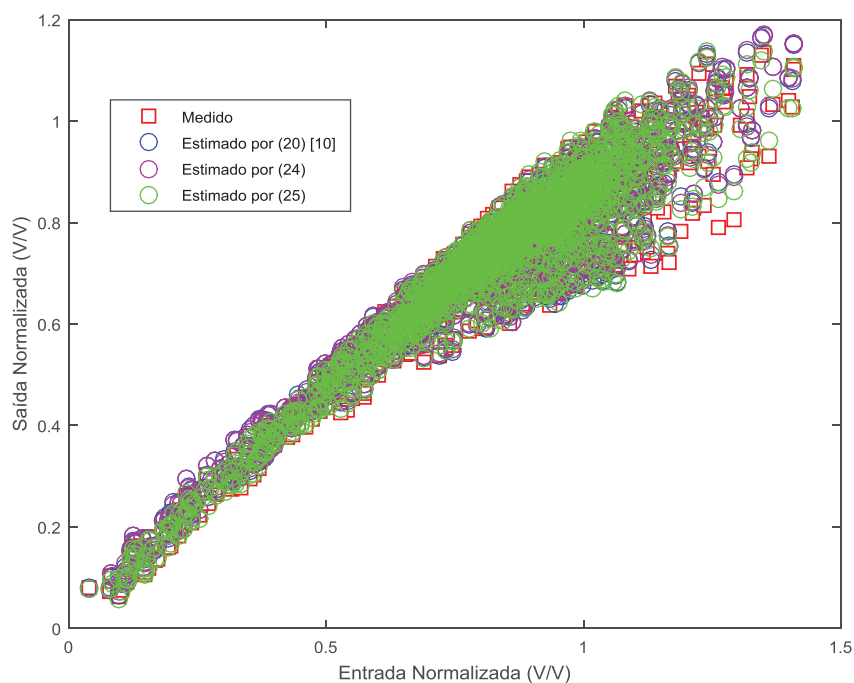
4.3.7 Características de Transferência para o Modelo Anterior e Modelos Propostos 2D e 3D.

Já citado anteriormente, a linearidade pode ser definida pela capacidade do APRF não introduzir distorções na amplitude e na fase do sinal amplificado. Essa verificação pode ser feita observando os gráficos das conversões de modulação em amplitude para modulação em amplitude (AM-AM) e de modulação em amplitude para modulação de fase (AM-PM),

mostrados nas figuras 34 e 35, para os modelos descritos por (20), (24) e (25). A FIGURA 34 apresenta as amplitudes dos sinais da saída estimada pelo modelo e medida, com o aumento da amplitude do sinal na entrada. A FIGURA 35 apresenta a diferença entre a fase do sinal da saída (estimada ou medida) e a fase do sinal de entrada, com o aumento da amplitude do sinal na entrada.

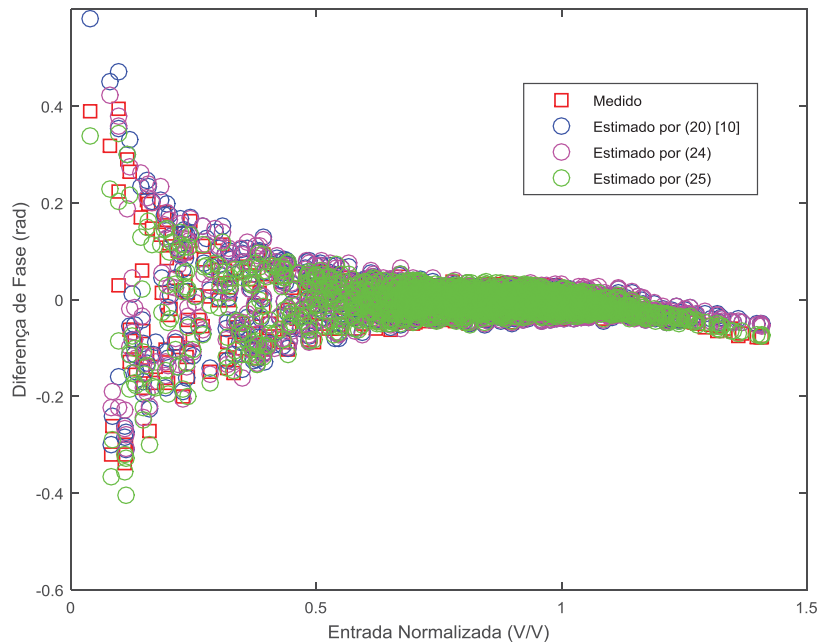
Nessas figuras pode-se observar que as diferenças entre o valor medido e os valores estimados pelos modelos propostos não são perceptíveis. Isso demonstra a ótima qualidade dos novos modelos.

FIGURA 34 - CONVERSÃO AM-AM PARA DADOS MEDIDOS E ESTIMADOS POR (20), (24) e (25) COM 30 COEFICIENTES



FONTE: O AUTOR (2018)

FIGURA 35 - CONVERSÃO AM-PM PARA DADOS MEDIDOS E ESTIMADOS POR (20), (24) E (25) COM 30 COEFICIENTES



FONTE: O AUTOR (2018)

Para melhor visualização, os erros na amplitude de saída e na diferença de fase são apresentados nas figuras 36 e 37, respectivamente.

Para o erro na amplitude de saída, apresentado na FIGURA 36, o menor erro foi obtido pelo modelo definido em (24).

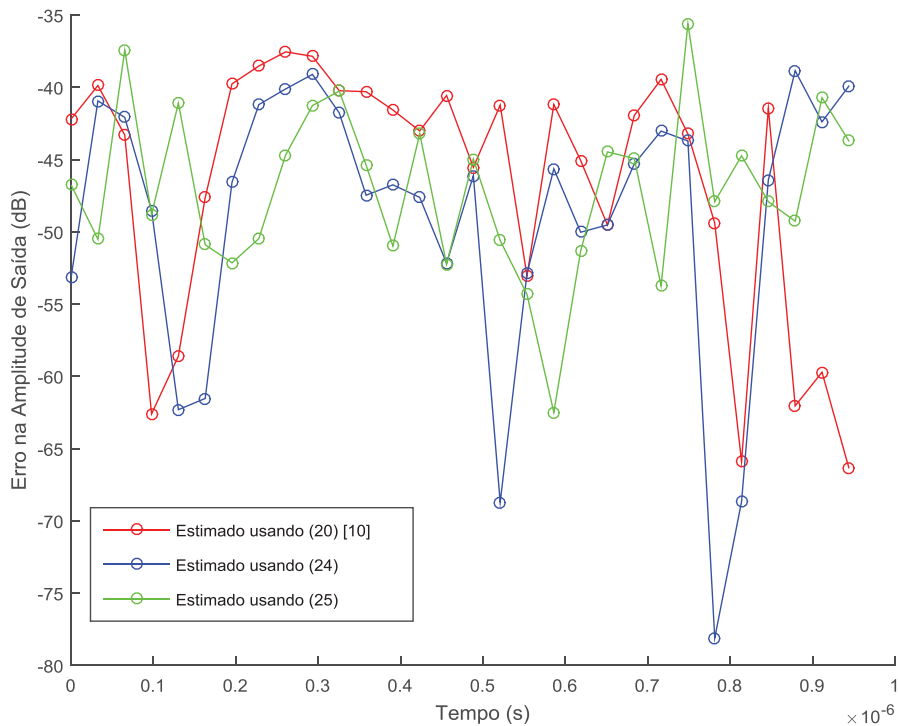
O gráfico da FIGURA 36 apresenta três situações distintas, que podem ser divididas em três intervalos de tempo.

Até $0,2 \mu\text{s}$ os modelos 2D, definidos em (20) e (24), apresentam menores erros que o modelo 3D, definido em (25).

A partir de $0,2 \mu\text{s}$ até $0,7 \mu\text{s}$, os novos modelos, propostos em (24) e (25), apresentam menores erros que o modelo existente na literatura, definido em (20). Também neste intervalo, é possível observar que os três modelos mantêm a diferença entre seus erros na amplitude de saída, exceto para dois instantes de tempo onde os modelos de (24) e (25) apresentam um erro bem menor que o modelo de (20).

Acima de $0,7 \mu\text{s}$ cada modelo apresenta uma característica para os valores dos erros obtidos.

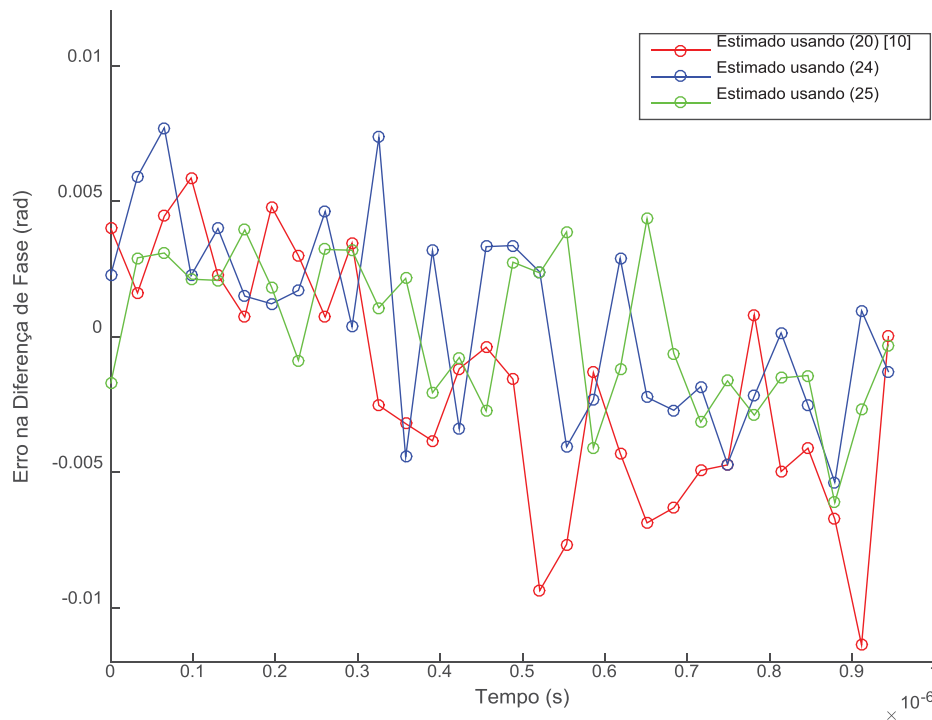
FIGURA 36 - ERRO NA AMPLITUDE DE SAÍDA ESTIMADO POR (20), (24) E (25) COM 30 COEFICIENTES



FONTE: O AUTOR (2018)

O erro na diferença de fase, apresentado na FIGURA 37, mostra de uma forma geral, que os três modelos mantêm seus erros na diferença de fase variando da mesma forma. Ou seja, as variações oscilam ora com os valores medidos maiores que os valores estimados, onde o erro é positivo, ora de forma inversa, onde os erros são negativos.

FIGURA 37 – ERRO NA DIFERENÇA DE FASE ESTIMADO POR (20), (24) E (25) COM 30 COEFICIENTES



FONTE: O AUTOR (2018)

De forma geral, pode-se concluir que as figuras 36 e 37 apresentam, de outra maneira, resultados compatíveis com as figuras 34 e 35. Porém a visualização dos resultados é mais clara que as figuras anteriores.

4.4 RESULTADOS PARA O APRF GaN HEMT DOHERTY

4.4.1 Definição dos Truncamentos de Ordem Polinomial e Duração de Memória.

O cenário ideal para ordem polinomial e duração memória são, respectivamente, $P = \infty$ e $M = \infty$.

Para a definição de valores finitos, valores máximos de truncamentos foram escolhidos após uma análise prévia dos dados que indicou uma presença mais acentuada de efeitos não lineares em relação aos efeitos de memória. As tabelas 14 e 15 mostram os resultados que levaram a escolha dos valores da ordem polinomial e duração de memória e as figuras 38, 39, 40 e 41 complementam as análises numéricas apresentadas nas tabelas.

TABELA 14 - ESCOLHA DOS TRUNCAMENTOS PARA OS MODELOS 2D.

Equação (20)	Nº de Coeficientes	NMSE (dB)
P = 3 M = 5	108	-24,97
P = 5 M = 3	140	-31,34

FONTE: O AUTOR (2018)

TABELA 15 - ESCOLHA DOS TRUNCAMENTOS PARA OS MODELOS 3D.

Equação (23)	Nº de Coeficientes	NMSE (dB)
P = 3 M = 5	168	-24,97
P = 5 M = 3	260	-31,45

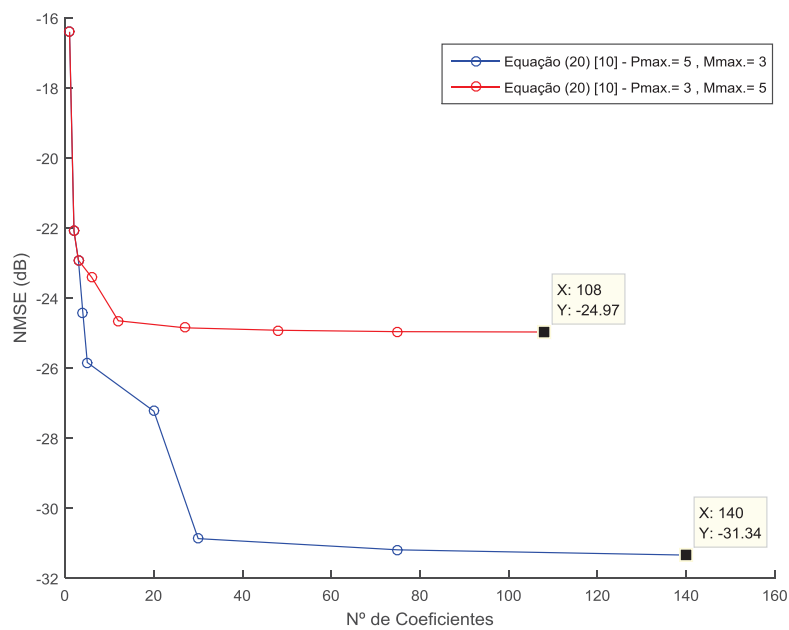
FONTE: O AUTOR (2018)

Através das tabelas 14 e 15, para este segundo APRF, pode-se observar que, com o maior número de coeficientes obtidos para valores de truncamentos $P = 5$ e $M = 3$, obteve-se melhor exatidão tanto para o modelo 2D completo definido em (20) como para o modelo 3D completo definido em (23).

Na FIGURA 38 pode-se observar os resultados para maior quantidade de modelos gerados, variando os truncamentos de ordem polinomial e duração de memória de seus valores mínimos até seus valores máximos, indicados na TABELA 14. Ou seja, obtém-se melhor exatidão para os modelos com valor do truncamento de ordem polinomial maior que o valor do truncamento de duração de memória.

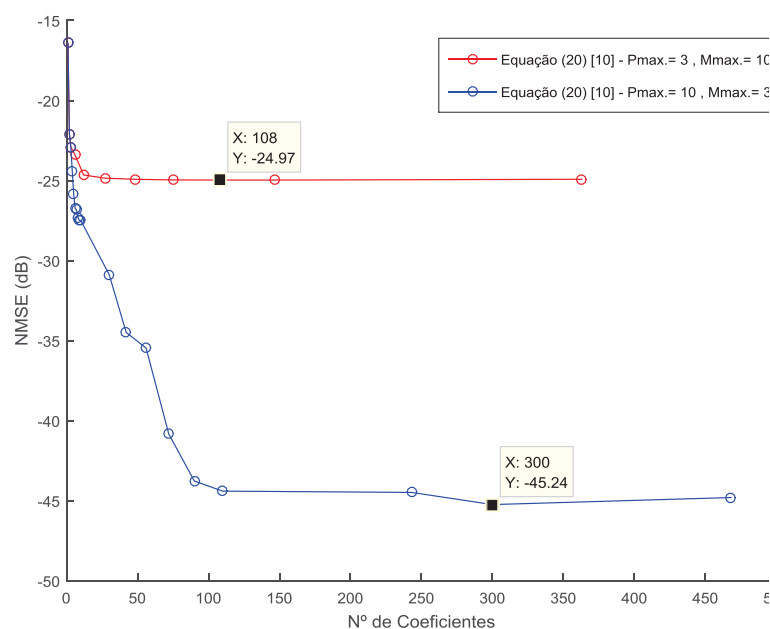
Na FIGURA 39 é apresentada uma segunda simulação, onde os valores máximos para os truncamentos de ordem polinomial e de duração de memória são superiores aos apresentados na FIGURA 38. Novamente, o aumento da não linearidade, devido ao truncamento de ordem polinomial, é mais eficiente para a exatidão do modelo comportamental nesse APRF. Também é possível observar, comparando os resultados das figuras 38 e 39, que para valores maiores da ordem polinomial a exatidão melhora. Na FIGURA 39 está mostrado um dos NMSEs obtidos para valores máximos de truncamento da TABELA 14 e incluído o NMSE para 300 coeficientes, que mostra uma significativa melhora na exatidão.

FIGURA 38 – NMSE EM FUNÇÃO DO NÚMERO DE COEFICIENTES PARA VALORES MÁXIMOS DE TRUNCAMENTOS $P_{max}=5$ E $M_{max}=3$, $P_{max}=3$ E $M_{max}=5$ UTILIZANDO O MODELO 2D (20) [10]



FONTE: O AUTOR (2018)

FIGURA 39 – NMSE EM FUNÇÃO DO NÚMERO DE COEFICIENTES PARA VALORES MÁXIMOS DE TRUNCAMENTOS $P_{max}=3$ E $M_{max}=10$, $P_{max}=10$ E $M_{max}=3$ UTILIZANDO O MODELO 2D (20) [10]



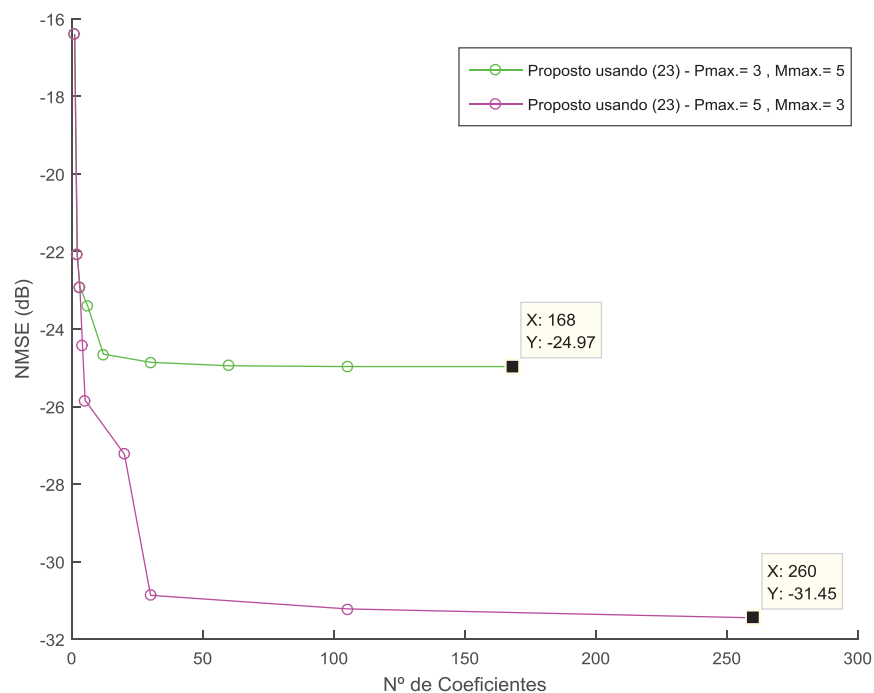
FONTE: O AUTOR (2018)

De forma similar ao procedimento para o modelo 2D completo, na FIGURA 40 pode-se observar os resultados para maior quantidade de modelos gerados, variando os truncamentos de ordem polinomial e duração de memória

de seus valores mínimos até seus valores máximos, indicados na TABELA 15, para o modelo 3D completo. Ou seja, obtém-se melhor exatidão para os modelos com valor do truncamento de ordem polinomial maior que o valor do truncamento de duração de memória.

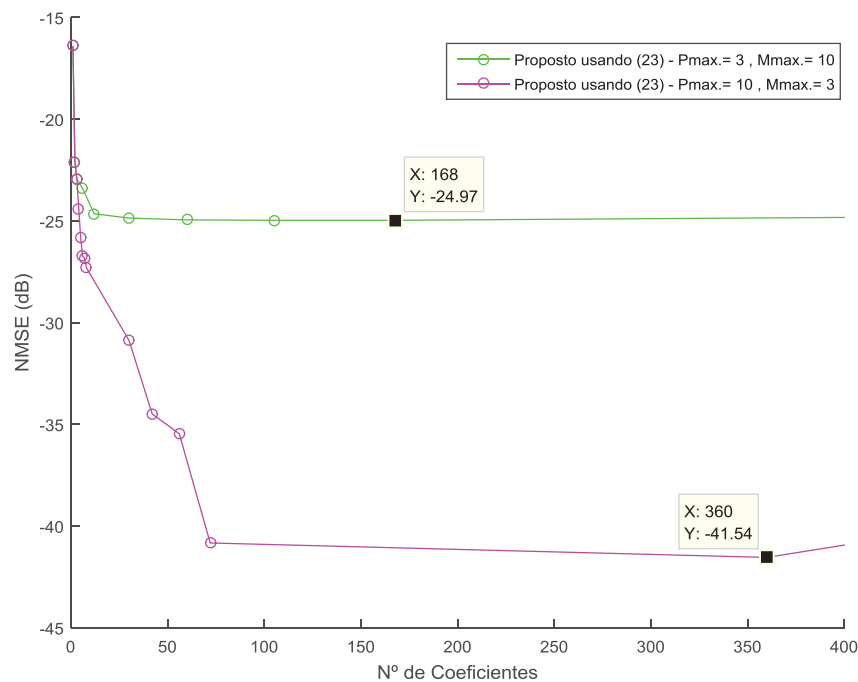
Na FIGURA 41 é apresentada uma segunda simulação, onde os valores máximos para os truncamentos de ordem polinomial e de duração de memória são superiores aos apresentados na FIGURA 40. Mais uma vez pode ser observado que o aumento da não linearidade é mais eficiente para a exatidão do modelo comportamental nesse APRF. Também é possível observar, comparando os resultados das figuras 40 e 41, que para valores maiores de ordem polinomial a exatidão melhora. Na FIGURA 41 está mostrado um dos NMSEs obtidos na TABELA 15 e incluído o ponto para 360 coeficientes, que mostra uma significativa melhora na exatidão.

FIGURA 40 – NMSE EM FUNÇÃO DO NÚMERO DE COEFICIENTES PARA VALORES MÁXIMOS DE TRUNCAMENTOS $P_{max}=3$ E $M_{max}=5$, $P_{max}=5$ E $M_{max}=3$ UTILIZANDO O MODELO 3D (23)



FONTE: O AUTOR (2018)

FIGURA 41 – NMSE EM FUNÇÃO DO NÚMERO DE COEFICIENTES PARA VALORES MÁXIMOS DE TRUNCAMENTOS $P_{\max.} = 3$ E $M_{\max.} = 10$, $P_{\max.} = 10$ E $M_{\max.} = 3$ UTILIZANDO O MODELO 3D (23)



FONTE: O AUTOR (2018)

Com base nessa análise os truncamentos de ordem polinomial P de (20), assim como os truncamentos $P1$ e $P2$ de (24) e $P1$, $P2$ e $P3$ de (25), foram variados entre seus valores mínimos até 5. Os truncamentos M de (20), assim como os truncamentos $M1$ e $M2$ de (24) e $M1$, $M2$ e $M3$ de (25), foram variados entre seus valores mínimos até 3.

4.4.2 Resultados para os Modelos Anterior e Propostos 2D e 3D com Restrições nos Truncamentos.

Os resultados obtidos para o NMSE em função do número de coeficientes estão mostrados nas figuras 42 e 43, e nas tabelas 16 e 17 e comentados a seguir.

Dois cenários de comparação serão utilizados para verificação da exatidão e da quantidade de coeficientes.

No primeiro caso serão verificados os modelos mais exatos com a mesma quantidade de coeficientes e, no segundo caso, para modelos com a mesma exatidão será verificado qual modelo possui o menor número de coeficientes.

A TABELA 16 e a FIGURA 42 apresentam os resultados para a primeira comparação.

Quando comparados os resultados obtidos pelo modelo 2D de (20), para 20 coeficientes, com os novos modelos 2D de (24) e 3D de (25), para 21

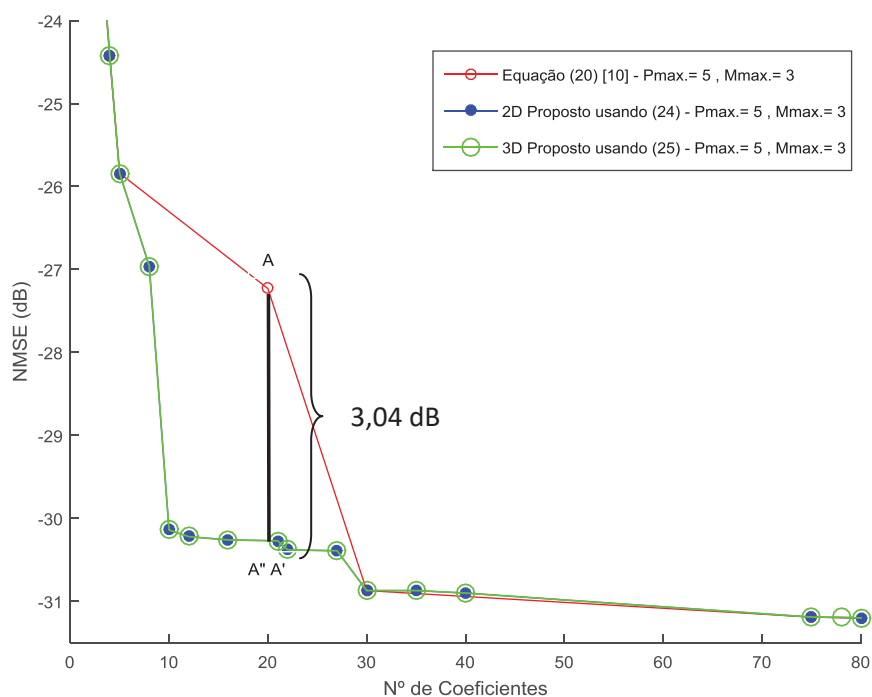
coeficientes, a redução no erro foi de 3,04 dB. A TABELA 16 resume o ponto escolhido, mostrado na FIGURA 42.

TABELA 16- COMPARAÇÃO ENTRE OS NMSEs OBTIDOS POR (20), (24) E (25) PARA O MESMO NÚMERO DE COEFICIENTES.

Número de Coeficientes	NMSE (dB)	Ganho no Erro (dB)	NMSE (dB)	Ganho no Erro (dB)	NMSE (dB)
	Modelo 2D (20) [10]		Modelo 2D (24)		Modelo 3D (25)
20	-27,23 (A)	3,04			
21			-30,27 (A')	0	-30,27 (A'')

FONTE: O AUTOR (2018)

FIGURA 42 - COMPARAÇÃO ENTRE OS MODELOS 2D (20), 2D (24) E 3D (25) PONTOS A, A', A'' DA TABELA 16



FONTE: O AUTOR (2018)

A próxima análise compara o número de coeficientes para modelos com o mesmo NMSE. A TABELA 17 e a FIGURA 43 apresentam esse resultado. Um caso apenas foi escolhido.

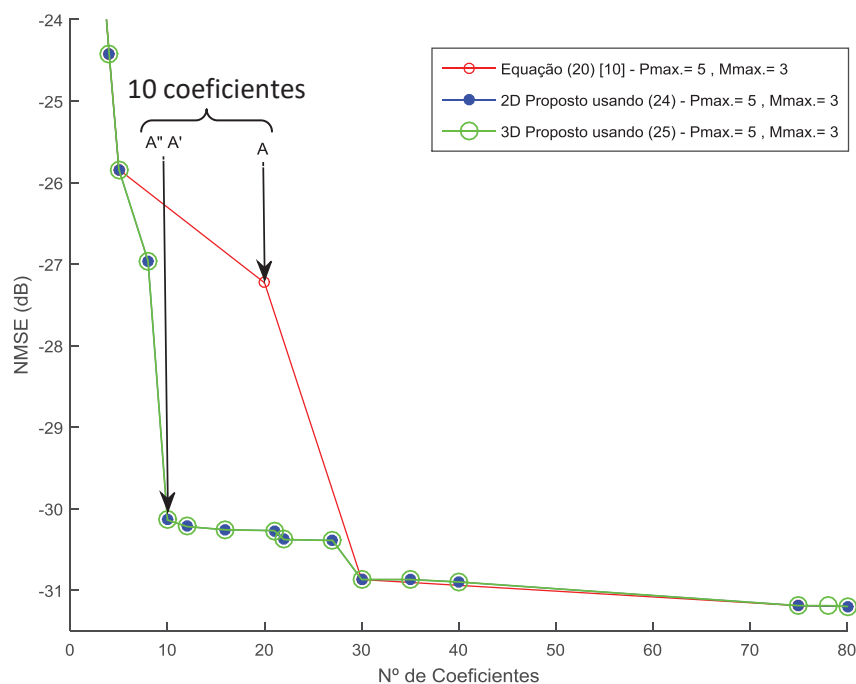
TABELA 17 - COMPARAÇÃO ENTRE OS NÚMEROS DE COEFICIENTES PARA O MESMO NMSE OBTIDOS POR (20), (24) E (25).

Nº de Coeficientes	Modelo 2D (20)	Modelo 2D (24)	Modelo 3D (25)
	NMSE (dB)	NMSE (dB)	NMSE (dB)
10		-30,14 (A')	-30,14 (A'')
20	-27,23 (A)		

FONTE: O AUTOR (2018)

Para obter-se o valor do NMSE igual a -27,23 dB, através de (20) são necessários 20 coeficientes, e em (25) ou (26), com 10 coeficientes, é obtida uma redução no erro igual a 2,91 dB, aliada a uma redução de 10 coeficientes. Essa redução, no número de coeficientes, representa 50 %.

FIGURA 43 - COMPARAÇÃO ENTRE OS MODELOS 2D (20), 2D (24) E 3D (25) – PONTOS A, A', A" DA TABELA 17



FONTE: O AUTOR (2018)

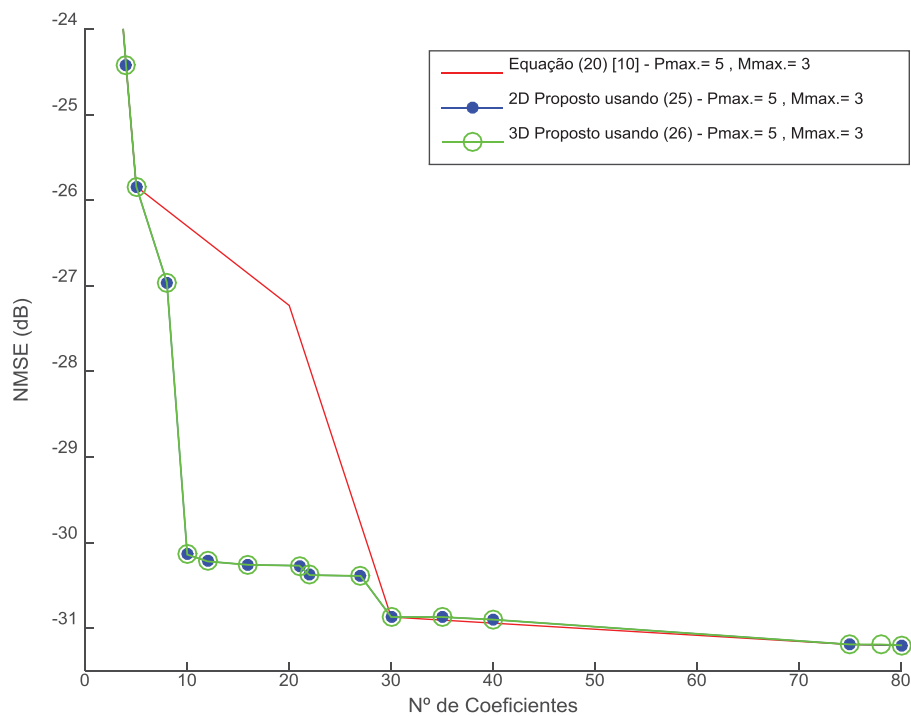
Da TABELA 16 e da FIGURA 42 pode-se observar que não houve melhoria entre os novos modelos propostos 2D e 3D com truncamentos independentes, descritos por (24) e (25), respectivamente. Essa situação pode ser melhor verificada através da TABELA 18 e da FIGURA 44. Nesta tabela são apresentados os melhores valores para o NMSE.

TABELA 18 - COMPARAÇÃO ENTRE OS MELHORES NMSEs EM (20), (24) E (25).

Modelo 2D (2) [10]		Modelo 2D (24)		Modelo 3D (25)	
Nº Coef.	NMSE (dB)	Nº Coef.	NMSE (dB)	Nº Coef.	NMSE (dB)
1	-16,4	1	-16,4	1	-16,4
2	-22,09	2	-22,09	2	-22,09
3	-22,92	3	-22,92	3	-22,92
4	-24,42	4	-24,42	4	-24,42
5	-25,84	5	-25,84	5	-25,84
		8	-26,96	8	-26,96
		10	-30,14	10	-30,14
		12	-30,22	12	-30,22
		16	-30,26	16	-30,26
20	-27,23				
		21	-30,27	21	-30,27
		22	-30,38	22	-30,38
		27	-30,39	27	-30,39
30	-30,87	30	-30,87	30	-30,87
		40	-30,9	40	-30,9
75	-31,19	75	-31,19	75	-31,19
140	-31,34	80	-31,2	80	-31,2
				105	-31,22
				110	-31,23
		140	-31,34	140	-31,34
				170	-31,37
				260	-31,45

FONTE: O AUTOR (2018)

FIGURA 44 - COMPARAÇÃO ENTRE OS MODELOS 2D (20), 2D (24) E 3D (25)

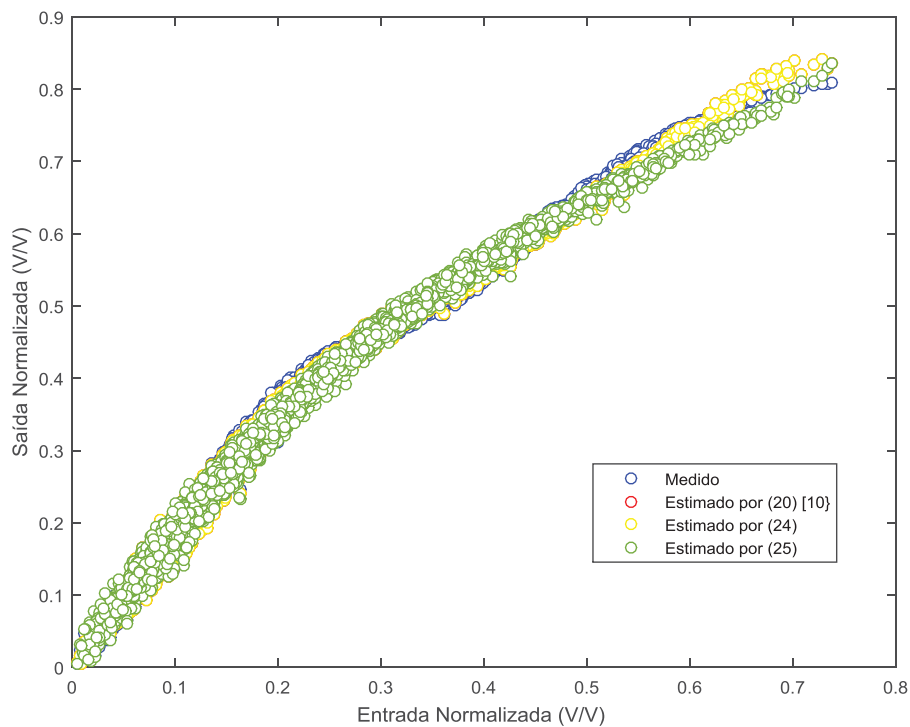


FONTE: O AUTOR (2018)

4.4.3 Características de Transferência para o Modelo Anterior e Modelos Propostos 2D e 3D.

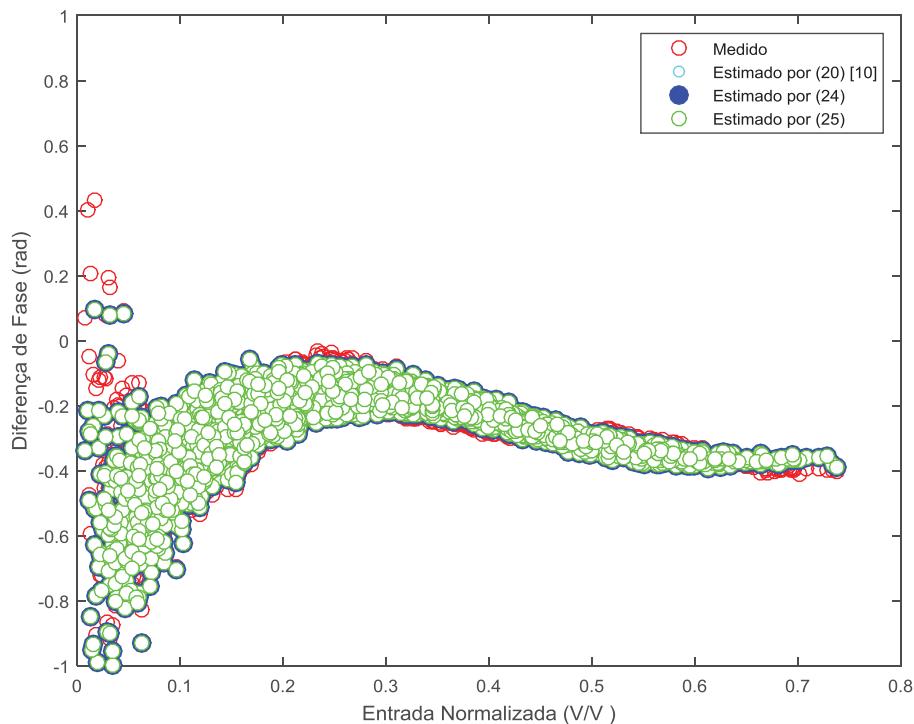
As figuras 45 e 46 mostram as conversões AM-AM e AM-PM, respectivamente. Nessas figuras pode-se observar que há divergências entre as curvas obtidas pelos modelos.

FIGURA 45 - CONVERSÃO AM-AM PARA DADOS MEDIDOS E ESTIMADOS POR (20), (24) E (25) COM 48 COEFICIENTES



FONTE: O AUTOR (2018)

FIGURA 46 - CONVERSÃO AM-PM PARA DADOS MEDIDOS E ESTIMADOS POR (20), (24) E (25) COM 48 COEFICIENTES



FONTE: O AUTOR (2018)

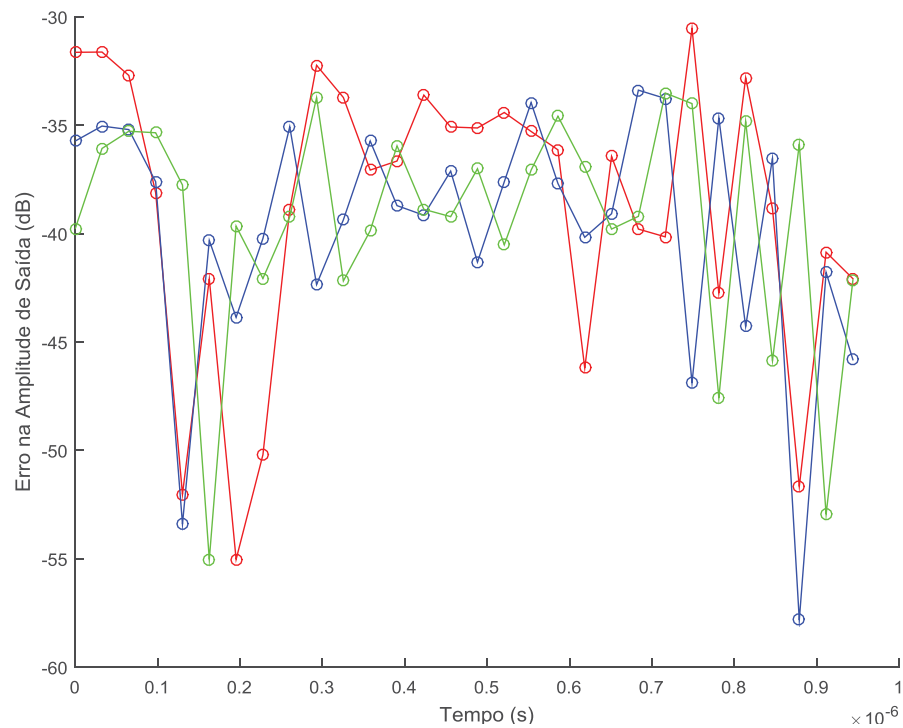
Para melhor visualização, os erros na amplitude de saída e na diferença de fase são apresentados nas figuras 47 e 48, respectivamente.

Para o erro na amplitude de saída, apresentado na FIGURA 47, o menor erro foi obtido pelo modelo definido em (24).

No início até $0,1 \mu\text{s}$ os modelos propostos por (24) e (25) apresentam menores erros que o modelo de (20), e os valores dos erros para os novos modelos propostos são muito próximos.

Entre $0,1 \mu\text{s}$ e $0,2 \mu\text{s}$ os modelos apresentam variações similares, chamando atenção para o melhor valor do erro para o modelo de (25), ao final do segundo incremento de tempo (Δt), cujo valor passa a ser apresentado pelo modelo de (20), no início do terceiro incremento de tempo (Δt). Isso mostra que variações no número de amostras alteram rapidamente o desempenho do modelo comportamental. A partir $0,2 \mu\text{s}$, e imediatamente após esse instante, os novos modelos, propostos em (24) e (25), apresentam menores erros que o modelo existente na literatura, definido em (20), e se mantêm assim até $0,6 \mu\text{s}$. Acima de $0,7 \mu\text{s}$ os modelos apresentam comportamentos individuais, ou seja, com valores dos erros distintos.

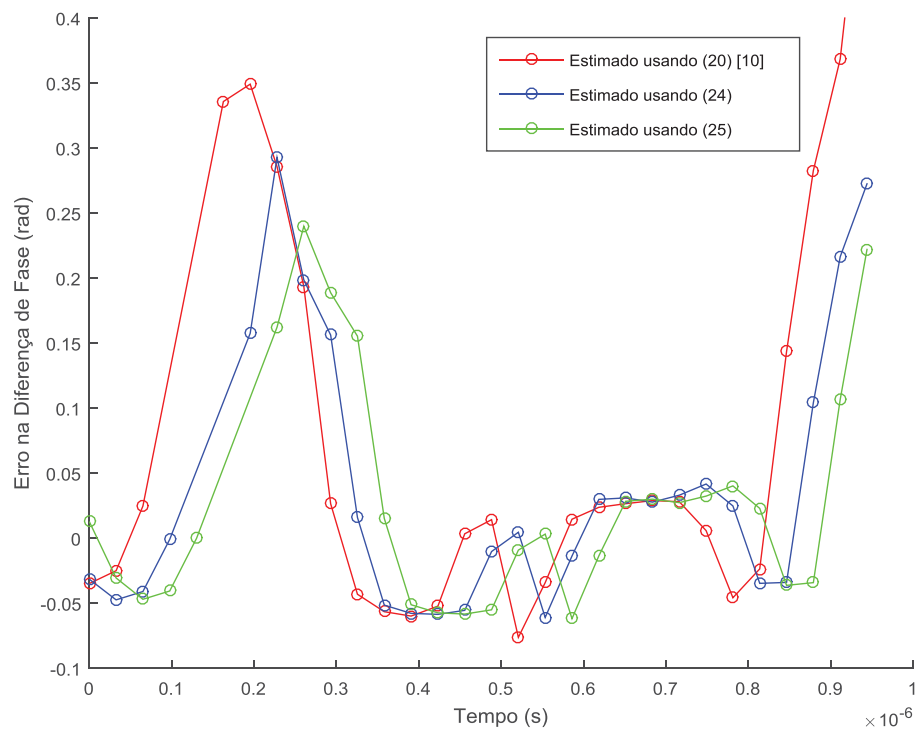
FIGURA 47 – ERRO NA AMPLITUDE DE SAÍDA ESTIMADO POR (20), (24) E (25) COM 30 COEFICIENTES



FONTE: O AUTOR (2018)

O erro na diferença de fase, apresentado na FIGURA 48, mostra de uma forma geral, que os três modelos mantêm seus erros na diferença de fase variando da mesma forma. Ou seja, as variações oscilam ora com os valores medidos maiores que os valores estimados, onde o erro é positivo, ora de forma inversa, onde os erros são negativos. Os maiores erros aparecem no intervalo de 0,05 μ s até 0,3 μ s.

FIGURA 48 – ERRO NA DIFERENÇA DE FASE ESTIMADO POR (20), (24) E (25) COM 30 COEFICIENTES



FONTE: O AUTOR (2018)

De forma geral, pode-se concluir que as figuras 47 e 48 apresentam, de outra maneira, resultados compatíveis com as figuras 45 e 46, porém a visualização dos resultados é mais clara que as figuras anteriores.

5 CONCLUSÃO

Este trabalho abordou a modelagem comportamental de APRFs através de séries compactas de Volterra. Para melhor reproduzir o comportamento do APRF, os modelos propostos são não lineares e com memória. Reproduzir a memória é possível quando se utilizam as entradas passadas do conjunto de dados utilizados. Os modelos propostos foram treinados e testados através de dois conjuntos de dados. Um conjunto medido em um APRF fabricado em tecnologia nitreto de gálio (GaN), com transistor HEMT operando em classe AB, e outro simulado, obtido de um modelo de circuito de um APRF na arquitetura Doherty, com transistores HEMT e adequado para fabricação na tecnologia GaN através de simulações de envoltória realizadas no simulador *Advanced Design System* (ADS) da Keysight Technologies.

Para redução da complexidade computacional o modelo utilizado é o equivalente passa-baixas. As exatidões dos novos modelos foram verificadas através de comparações realizadas com modelo anterior, disponível na literatura. O modelo anterior utiliza termos unidimensionais e bidimensionais tendo a mesma ordem polinomial e a mesma duração de memória para os termos unidimensionais e bidimensionais. O primeiro modelo proposto possui termos unidimensionais e bidimensionais e o segundo, além dos termos do primeiro modelo, inclui os termos tridimensionais. A diferença dos novos modelos em relação ao anterior está na maior flexibilidade de escolha dos truncamentos, pois utilizam a ordem polinomial e a duração de memória independentes para cada uma das dimensões. Para obtenção dos resultados foi utilizado o ambiente MATLAB, no qual foram variados os valores dos truncamentos e determinada a exatidão para cada caso analisado. A análise dos resultados contemplou em uma primeira comparação os valores do erro quadrático médio normalizado para um mesmo número de coeficientes e, em uma segunda análise, para um mesmo erro verificou-se a possibilidade de redução do número de coeficientes. Estas duas análises foram realizadas para os dois APRFs.

Para a modelagem comportamental foram realizadas análises para determinação dos fatores dos truncamentos de ordem polinomial e de duração

de memória. Desta análise identificou-se que para o APRF classe AB os efeitos de memória foram mais acentuados em relação aos efeitos não lineares, diferentemente para o APRF com tecnologia Doherty, onde os efeitos não lineares se sobressaíram mais que os efeitos de memória. Desta forma, para o primeiro APRF, foi mais adequado utilizar fatores do truncamento de ordem polinomial menores que os fatores do truncamento de duração de memória. De forma inversa, para o segundo APRF, foram utilizados fatores do truncamento de ordem polinomial maiores que os fatores do truncamento de duração de memória. Adicionalmente a essa análise, é importante ressaltar que, em qualquer um dos casos, a melhor exatidão obtida pelos modelos propostos fica condicionada ao aumento da dimensão dos modelos e a inclusão de truncamentos específicos em todas as dimensões.

Para demonstrar a melhoria na exatidão em função dos avanços nos modelos comportamentais, foi apresentada uma comparação entre os modelos sem memória, polinômio de memória unidimensional e polinômio de memória bidimensional completo, existentes na literatura. Entre esses três modelos, fica evidenciado que modelos comportamentais para APRF devem levar em consideração, além das não linearidades, os efeitos de memória. Além disso, o aumento na dimensão dos modelos melhora a exatidão com redução no número de coeficientes. Melhorar a exatidão significa que o modelo matemático representa melhor o APRF físico, e redução no número de coeficientes significa reduzir o custo computacional para fins de linearização.

Os resultados das comparações entre os modelos propostos e o anterior, existente na literatura, também mostraram-se positivos.

Para o APRF classe AB, os novos modelos apresentaram redução no NMSE da ordem de 2,98 dB entre os modelos limitados aos termos bidimensionais, e da ordem de 2,95 entre os modelos propostos 2D e 3D com truncamentos independentes. Houve também melhoria na quantidade de coeficientes para obtenção do mesmo erro. Entre os modelos com termos bidimensionais houve redução de 10 coeficientes, enquanto que entre os dois novos modelos a redução obtida foi de 15 coeficientes. Para o segundo APRF não houve redução no erro comparando os novos modelos 2D e 3D, de (24) e (25), respectivamente. A redução no erro para a mesma quantidade de coeficientes ocorreu entre os novos modelos, 2D ou 3D, comparados ao

modelo da literatura, descrito por (20). Para 20 coeficientes a redução no erro foi de 3,04 dB e, do número de coeficientes, para a mesma exatidão, foi de 10 coeficientes.

De forma geral pode-se concluir que os novos modelos apresentaram benefícios devido à flexibilidade proporcionada pelos truncamentos independentes.

REFERÊNCIAS

- [1] N. Bhushan, J. Li, D. Malladi, R. Gilmore, D. Brenner, A. Damnjanovic, R. Sukhavasi, C. Patel, and S. Geirhofer, "Network densification: the dominant theme for wireless evolution into 5G," *IEEE Commun. Mag.*, vol.52, no.2, pp.82,89, Feb. 2014.
- [2] D. Raychaudhuri and N. B. Mandayam, "Frontiers of Wireless and Mobile Communications," *Proc. IEEE* , vol.100, no.4, pp.824-840, Apr. 2012.
- [3] F. H. Raab, P. Asbeck, S. Cripps, P. B. Kenington, Z. B. Popovic, N. Potheary, J. F. Sevic, and N. O. Sokal, "Power amplifiers and transmitters for RF and microwave," *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol.50, no.3, pp.814–826, Mar. 2002.
- [4] S. Cripps, *RF Power Amplifiers for Wireless Communications*, 2nd edition. Norwood, MA: Artech House, 2006.
- [5] P. B. Kenington, *High Linearity RF Amplifier Design*, Artech House Publishers – Boston-London, 2000, ISBN 1-58053-143-1, 2000.
- [6] J. C. Pedro and S. A. Maas, "A comparative overview of microwave and wireless power-amplifier behavioral modeling approaches," *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 53, no. 4, pp. 1150–1163, Apr. 2005.
- [7] M. Schetzen, "Nonlinear system modeling based on the Wiener theory," *Proc. IEEE*, vol. 69, no. 12, pp. 1557–1573, Dec. 1981.
- [8] 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.
- [9] D. R. Morgan, *Senior Member, IEEE*, Z. Ma, J. Kim, M. G. Zierdt, and J. Pastalan. *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 54, no. 10, Oct. 2006
- [10] E. J. Bonfim and E. G. Lima, "Um Novo Modelo com Memória baseado em Aproximações Polinomiais Bidimensionais para Transmissores de Sistemas de Comunicações sem Fio," in 33^o Simpósio Brasileiro de Telecomunicações, Juiz de Fora - MG, Sept. 2015, pp 103-107.
- [11] 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 *Progress In Electromagnetics Research M*, Vol. 47, 27–35, 2016
- [12] T. Du*, C. Yu, Y. Liu, J. Gao, S. Li, and Y. Wu, A New Accurate Volterra-Based Model for Behavioral Modeling and Digital Predistortion of RF Power Amplifiers. *Progress In Electromagnetics Research C*, vol. 29, 205 - 218, 2012

- [13] R. A. Veiga, Observação em circuito da Distorção de Um Amplificador de RF. Dissertação de Mestrado. FEUP - Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Jul. 2009
- [14] V. Mathews and G. Sicuranza, Polynomial Signal Processing. New York: Wiley, 2000.
- [15] T. N. de Figueiredo, Amplificador de potência de RF banda larga para aplicação em transceptores multibanda, Dissertação de Mestrado, PUC-Rio. Dez. 2012.
- [16] C. L. 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. Dissertação de Mestrado. UFPR, 2016.
- [17] J. T. Stauth and S. R. Sanders, Dynamic power supply design for highefficiency wireless transmitters. Berkeley, CA: Master's thesis, EECS Department, University of California, Technical Report no UCB/EECS-2006-72, May 2006.
- [18] H. D. Rodrigues, Linearização de Amplificadores de Potência de RF com Pré-Distorção Digital Ortogonal e Realimentação Escalar, Teses de Doutorado, Universidade de Itajubá, MG. Out, 2017.
- [19] J. C. Pedro and N. B. Carvalho, Intermodulation distortion in microwave and wireless circuits. Artech House, 2002.
- [20] E.G. de Lima, T. R. Cunha, J. C. Pedro, A Physically Meaningful Neural Network Behavioral Model for Wireless Transmitters Exhibiting PM-AM/PM-PM Distortions. IEEE Trans. Microw. Theory Tech., v. 59, n. 12, p. 3512-3521, 2011.
- [21] M. S. Muha, C. J. Clark, A. Moulthrop, and C. P. Silva, "Validation of power amplifier nonlinear block models," in *IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Dig.*, Anaheim, Jun. 1999, pp. 759-762.
- [22] E. G. de Lima, Behavioral modeling and digital base-band predistortion of RF power amplifiers, PhD Thesis, Politecnico di Torino, January 2009.