



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ  
SETOR DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA  
CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

Leonardo de Andrade Santos

# **Projeto de um circuito integrado de um pré-distorcedor digital baseado em polinômio de memória**

**Curitiba  
2024**

Leonardo de Andrade Santos

# **Projeto de um circuito integrado de um pré-distorcedor digital baseado em polinômio de memória**

Trabalho de conclusão de curso do Curso de Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Paraná, como exigência parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientadora: Sibilla Batista da Luz França

**Curitiba  
2024**

# Resumo

A evolução dos sistemas de comunicação sem fio acarretou na implementação de diversas aplicações moveis e sem fio como desenvolvimento web, aplicação IoT, entre outros. Neste cenário, melhorar a eficiência energética se torna uma alternativa desejável tanto para os dispositivos móveis que buscam melhorar a autonomia das suas baterias, quanto para as estações de rádio base, que buscam reduzir seus desperdícios em perdas de calor. No entanto uma melhor eficiência energética implica em uma menor linearidade nos sistemas de amplificação de sinais, presentes nos sistemas transmissores de sinais de rádio. Isto é importante de ser ressaltado, pois a banda reservada para aplicações móveis é reduzida, de forma que para se alcançar maiores taxas de transmissão é necessário alternar estratégias de modulação tanto da fase (FM), quanto da amplitude (AM) da onda portadora. E isso é conflituoso já que a modulação AM é sensível à linearidade, de forma que quanto mais linear um sistema menores erros de transmissão ocorrem. Sendo assim uma alternativa para contornar esse obstáculo, que é implementar um sistema, eficiente energeticamente e linear é a implementação de um Pré-Distorcedor Digital (DPDP - Digital Pre-Distorter) em cascata com um Amplificador de Potência (PA - Power Amplifier). Portanto, o objetivo deste trabalho de conclusão de curso é o design de um circuito integrado dedicado de um DPD.

**Palavras-chave:** VHDL, FPGA, DPD .

# Lista de abreviaturas e siglas

DPD	Pré-Distorcedor Digital
FPGA	Matriz de Portas Programáveis em Campo
PA	Amplificador de Potência
RF	Rádio Frequência
PARF	Amplificador de Potência de Rádio Frequência
HDL	Linguagem de Descrição de software
VHSIC	Circuito integrado de Velocidade Muito Elevada
VHDL	VHSIC Hardware Description Language
LUT	Look Up Table
SOP	Soma de Produtos
LAB	Logic Array Block
ALM	Adaptive Logic Module
LE	Logic Element
HEMT	transistor de efeito de campo de heterojunção
VSA	analisador de sinal vetorial

# Lista de ilustrações

Figura 1 – Sistema de transmissão simplificado . . . . .	3
Figura 2 – Curva de saída do amplificador . . . . .	4
Figura 3 – ilustração do pré-distorcedor em cascata . . . . .	4
Figura 4 – Estrutura Interna da FPGA Stratix X da Intel . . . . .	6
Figura 5 – Estrutura Interna da FPGA Ultrascale+ . . . . .	7
Figura 6 – Fluxo de projeto VLSI . . . . .	9

# Sumário

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO . . . . .</b>	<b>1</b>
<b>1.1</b>	<b>Objetivo Geral . . . . .</b>	<b>1</b>
<b>1.2</b>	<b>Objetivos Específicos . . . . .</b>	<b>2</b>
<b>2</b>	<b>REVISÃO DE LITERATURA . . . . .</b>	<b>3</b>
<b>2.1</b>	<b>Modelagem Matemáticas . . . . .</b>	<b>5</b>
<b>2.2</b>	<b>FPGA . . . . .</b>	<b>6</b>
<b>3</b>	<b>MATERIAL E MÉTODOS . . . . .</b>	<b>8</b>
<b>3.1</b>	<b>Estudo dos DPDs . . . . .</b>	<b>8</b>
<b>3.2</b>	<b>Implementação em software . . . . .</b>	<b>8</b>
<b>3.3</b>	<b>Implementação em FPGA . . . . .</b>	<b>8</b>
<b>3.4</b>	<b>Design e validação . . . . .</b>	<b>8</b>
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO . . . . .</b>	<b>10</b>
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO . . . . .</b>	<b>11</b>
	<b>REFERÊNCIAS . . . . .</b>	<b>12</b>
	<b>ANEXOS</b>	<b>13</b>

# 1 Introdução

A evolução dos sistemas de comunicação móveis, impulsionada pela crescente demanda por comunicações mais rápidas e eficientes, tem levado à implementação de uma variedade de serviços, incluindo aplicações multimídia, desenvolvimento web e aplicações IoT (1). No entanto, essa evolução também trouxe desafios significativos, como a necessidade de melhorar a eficiência energética, tanto para dispositivos móveis, visando aumentar a autonomia da bateria, quanto para estações de rádio base, visando reduzir o consumo de energia devido às perdas de calor. Para atender a essas demandas, estratégias de modulação que alteram tanto a fase quanto a amplitude de ondas portadoras em radiofrequência se tornaram essenciais (2). Além disso, a modulação na amplitude requer linearidade na transmissão para evitar erros e interferências na comunicação entre usuários vizinhos (3). Essa complexa tarefa recai sobre o projetista do amplificador de potência de radiofrequência (PARF), que enfrenta o desafio de desenvolver um hardware eficiente em termos energéticos e linear ao mesmo tempo, uma vez que esses dois objetivos podem entrar em conflito (4). Uma solução para contornar esse desafio é a implementação de um pré-distorcedor de Sinais Digital em Banda Base, que visa compensar a distorção causada pelo PARF (3). O DPD é conectado em cascata ao PARF e requer um modelo de alta precisão e baixa complexidade computacional para representar as características de transferência direta e inversa do PARF. Existem duas abordagens para modelar o PARF: modelos físicos, que são detalhadas e computacionalmente complexos, e modelos empíricos, que se baseiam em medições de entrada e saída do PARF, com menor complexidade computacional, mas com uma possível diminuição da precisão. Devido às exigências rigorosas de frequência de operação, a paralelização das operações torna-se essencial, e os Arranjos de Portas Programáveis em Campo emergem como uma alternativa viável para a implementação de circuitos pré-distorcedores (5). As FPGAs são dispositivos lógicos programáveis que permitem a reconfiguração física de componentes de eletrônica digital, acelerando processos e suportando operações paralelas e sequenciais. Neste contexto esse projeto foi planejado com os seguintes objetivos geral e específicos

## 1.1 Objetivo Geral

o desenvolvimento de um circuito integrado dedicado para um pré-distorcedor digital na tecnologia BiCMOS 130 nm 8HP.

## 1.2 Objetivos Específicos

Para alcançar esse objetivo geral esse trabalho foi desenvolvido, separando-o nos seguintes objetivos específicos:

1. Fazer modelagem fiel do PA em software;
2. Fazer modelagem do DPD em software a partir da modelagem do PA;
3. Implementar o DPD em hardware utilizando uma HDL;
4. Fazer Design do circuito integrado



## 2 Revisão de Literatura

O sistema de comunicação pode ser dividido em 3 sub-sistemas principais:

- Meio transmissor;
- Receptor;
- Transmissor;

No entanto, este trabalho foca exclusivamente no sistema transmissor, ilustrado pela figura 1, onde observa-se diversos elementos de que compõem o transmissor de sinal e dentre esses elementos tem-se que o amplificador de sinal é o componente de maior demanda energética, por se tratar do componente que converte a energia da fonte em energia irradiada pela antes de transmissão. Então para que o sistema de transmissão atue de maneira eficiente é imprescindível que o transmissor atue da maneira mais eficiente o possível. Conforme argumentado por (6).

Fonte: autor



Figura 1 – Sistema de transmissão simplificado

Sabe-se que a evolução dos sistemas de comunicação móveis causou na implementação de diversos serviços como aplicações multimídias, desenvolvimento web, aplicações IoT. De acordo com (1), há uma demanda cada vez maior por sistemas de comunicação mais rápidos, robustos e eficientes, devido ao aumento no número de usuários. Nesse contexto, melhorar a eficiência energética se mostra uma alternativa desejável tanto para aparelhos moveis, visando melhorar a autonomia da bateria, quanto para estações rádio base, uma vez que diminuiria o gasto de potência por perdas em calor. Considerando também que a largura de banda reservada para sistemas de comunicação sem fio é reduzida, torna-se desejável que ela seja utilizada da maneira mais eficiente o possível. Diante desse cenário, segundo (2), só é possível alcançar as maiores taxas utilizando estratégias de modulações, que alterem tanto a fase quanto a amplitude de uma onda portadora em rádio frequência. Ainda segundo (2), a modulação na amplitude, exige linearidade na transmissão afim de evitar erros e interferência na comunicação entre os usuários vizinhos. Ante esse panorama, o projetista do PARFT se depara com esse desafio, que é desenvolver um hardware eficiente, energeticamente, e com uma boa linearidade simultaneamente, uma vez que esse compromisso é conflitante, conforme descrito por (3). Esse comportamento se

deve, pois, um PARF, atua de forma eficiente, ou seja, com baixo consumo de energia, na área próxima à de saturação, que é a região em que eles operam em regimes não lineares, conforme ilustrado pela figura 2.

Fonte: (4)

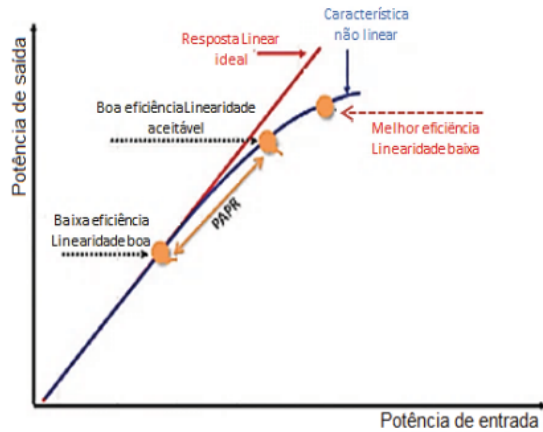


Figura 2 – Curva de saída do amplificador

A fim de contornar esse obstáculo foi adicionado a cadeia de transmissão, um método de equalização de sinais, conforme argumentado por (2). Um exemplo de técnica de linearização de sinais é a implementação de um pré-distorcedor de Sinais Digital em banda base, o qual apresenta um melhor custo-benefício (2). Essa técnica consiste em distorcer o sinal de entrada utilizando técnicas de processamento digital, antes que esse module uma portadora, de forma compensativa à distorção causada pelo PARF. De maneira sucinta, o DPD é conectado em cascata ao PARF e é projetado de forma que apresenta a função transferência inversa ao PARF. Para isso, é necessário um modelo de alta precisão e baixa complexidade computacional, capaz de representar as características de transferência direta e inversa de um PARF. Isso significa então modelar o seu comportamento real utilizando um software. A figura 3 ilustra o processo do um pré-distorcedor digital.

Fonte: (4)

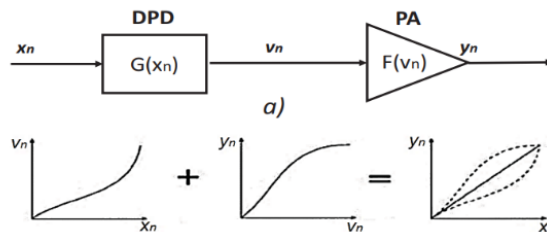


Figura 3 – ilustração do pré-distorcedor em cascata

Segundo (1), existem duas técnicas utilizadas para fazer essa modelagem. Uma consiste na descrição detalhada do PARF, que implica em uma maior complexibilidade computacional, esses modelos são conhecidos como modelos físicos. A outra abordagem

é conhecida como modelo empírico, este modelo consiste em coletadas amostradas na entrada e na saída do PARF em domínio temporal, e através destes dados simulam um modelo matemático do sistema. Uma das vantagens desse método é que ele não exige conhecimento prévio da estrutura do PARF e possui baixa complexidade computacional e mesmo se todos os parâmetros fossem conhecidos, conhecendo o equacionamento completo do circuito, uma função inversa poderia ser encontrada, possivelmente muito mais complexa que séries de Volterra. No entanto, sua precisão pode ser ligeiramente afetada pelo modelo adotado. Sendo assim, como a proposta do projeto é a implementação de um DPD em hardware, então se faz necessário que o circuito apresente a menor complexidade possível, por tanto, torna-se mais viável fazer a implementação utilizando modelagem matemática.

## 2.1 Modelagem Matemáticas

### Séries de Volterra

Segundo (7) série de Volterra pode ser vista como uma extensão multidimensional da série de Taylor para sistemas dinâmicos. A modelagem começa com a representação do sistema através de uma série infinita de integrais convolucionais, onde cada termo da série corresponde a uma ordem de não linearidade e memória.

A saída  $y(t)$  de um sistema pode ser expressa pela equação 2.1:

$$y(t) = h_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \cdots \int_{-\infty}^{\infty} h_n(\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n) \prod_{i=1}^n x(t - \tau_i) d\tau_i \quad (2.1)$$

Onde  $h_n$  são os núcleos de Volterra, que caracterizam a resposta do sistema para a  $n$ -ésima ordem de não linearidade e  $x(t)$  é a entrada do sistema.

Os núcleos de Volterra  $h_n$  são funções de várias variáveis que capturam a dinâmica do sistema em diferentes ordens. Para a maioria das aplicações práticas, a série é truncada para incluir apenas um número finito de termos, já que a identificação de todos os núcleos de uma série infinita é impraticável.

### Polinômio de memória

Um modelo simples, utilizado na modelagem comportamental simplificada das séries de Volterra considerando apenas componentes unidimensionais<sup>2</sup> é o MP, que é um modelo compacto, de baixo custo computacional e linear em seus parâmetros<sup>3</sup>. O MP gera baixo erro quando aplicado à PAs que apresentam pouco efeito de memória<sup>4</sup>. O DPD e pós distorsor apresentam característica inversa a do PA (6), portanto o mesmo modelo pode ser utilizado. A equação 2.2 apresenta o MP conforme apresenta (6):

$$y(n) = \sum_{p=1}^P \sum_{m=0}^M h_{p,m} x(n-m) |x(n-m)|^{p-1} \quad (2.2)$$

Como a proposta do trabalho é a implementação em hardware desse modelo, então torna-se necessário paralelizar operações aritméticas de forma a alcançar uma taxa de operação que satisfaça a norma regulamentadora. Nesse contexto, as FPGAs apresentam-se como uma alternativa viável para a implementação de circuitos pré-distorcedores

## 2.2 FPGA

Como foi visto em (5), FPGAs, são uma classe de dispositivos lógicos programáveis, ou seja, permitem a reconfiguração física de seus componentes de eletrônica digital, que ocorre através de uma linguagem de descrição de hardware. As FPGAs consistem, basicamente, em um conjunto de sub circuitos digitais interconectados que realizam funções comuns e ao mesmo tempo, possuem alto nível de flexibilidade, portanto, pode ser utilizada para processamento de imagem em tempo real, machine learning, entre outras aplicações. As FPGAs possuem a capacidade de sintetizar complexas arquiteturas de eletrônica digital o que acaba resultando em um funcionamento bastante paralelizado, permitindo um processamento rápido envolvendo várias portas de entrada e saída, mas sem excluir a possibilidade de desenvolver códigos sequenciais. A estrutura interna de uma FPGA é fundamentalmente composta por blocos lógicos interligados, dispostos como uma matriz. Cada bloco é composto por um determinado número de sub-blocos, e os sub-blocos possuem os componentes mais básicos da hierarquia. As FPGAs da Intel e da Xilinx possuem diferenças na nomenclatura dos blocos e sub-blocos, bem como na organização dos sub-blocos, como exemplificado na Figura 4 e na Figura 5, que mostram as FPGAs Intel Stratix X e Xilinx Ultrascale+, respectivamente. As arquiteturas fundamentalmente são semelhantes, já que a forma de matriz dos blocos e a funcionalidade dos componentes fundamentais são universais. Os blocos lógicos recebem o nome de LAB em FPGAs da Intel, e CLB em FPGAs da ilinx. Os sub-blocos são denominados ALM ou LE dependendo da FPGA da Intel, e são denominados Slices nos FPGAs da Xilinx.

Fonte: (5)

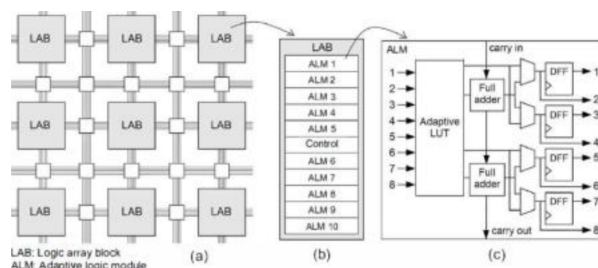


Figura 4 – Estrutura Interna da FPGA Stratix X da Intel

Os sub-blocos das FPGAs são compostos por LUTs e registradores. As LUTs são compostas por uma árvore binária de multiplexadores 2:1, permitindo o armazenamento de uma função lógica na forma de SOP. Os registradores são os componentes síncronos

Fonte: (5)

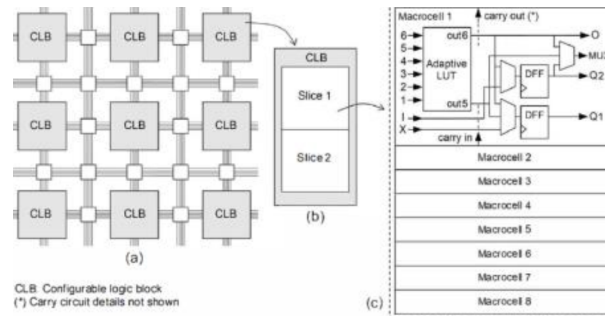


Figura 5 – Estrutura Interna da FPGA Ultrascale+

dos sub-blocos. Além da estrutura mencionada, FPGAs comumente possuem diversos módulos integrados, como CPUs, DSPs, memória Flash, PLLs, que aumentam ainda mais as capacidades do FPGA.

Como mencionado anteriormente, as FPGAs são programadas utilizando uma linguagem de descrição de hardware, sendo VHDL uma das mais comuns para a síntese de circuitos integrados de alta velocidade. Foi criada por uma iniciativa financiada pelo departamento de defesa dos Estados Unidos em meados dos anos 80 e foi a primeira linguagem de descrição de hardware padronizada pela IEEE. A estrutura de um código VHDL consiste em três partes principais: declaração de bibliotecas/pacotes, entidade e arquitetura. Na primeira parte, são listadas as bibliotecas e pacotes necessários para o projeto. As bibliotecas padrão incluem a std e a work. A entidade, que é a interface do sistema, descreve as entradas e saídas e é dividida em duas partes: parâmetros e conexões. Os parâmetros são valores constantes, como a largura de um barramento, que são declarados como genéricos. As conexões, por sua vez, definem a transferência de informações e correspondem aos pinos de entrada e saída do circuito. Já a arquitetura é a parte principal do sistema, onde o circuito é descrito. Nessa seção, são definidas as atribuições, operações lógicas e aritméticas, comparações, entre outros. Há também uma parte declarativa da sintaxe, que apresenta uma ampla variedade de declarações possíveis. Sendo assim, circuitos digitais para processamento de sinais em tempo real são muito utilizados em sistemas de comunicações sem fio. Um exemplo de aplicação são os pré-distorcedores para transmissores sem fio. Os PDs são baseados em operações matemáticas que envolvem uma grande quantidade de operações de soma, produto e tabelas de busca. Devido às rigorosas exigências de frequência de operação, torna-se fundamental a paralelização das operações necessárias. Nesse contexto, as FPGAs são uma alternativa viável para a implementação de circuitos pré-distorcedores.

## 3 Material e Métodos

Conforme dito anteriormente o trabalho busca o desenvolvimento do design do circuito integrado de um DPD, a partir de um modelo validado em software, e em hardware, no caso, FPGA. Para isso esse projeto foi dividido em 4 etapas principais:

- Estudo DPD;
- Implementação em software;
- Implementação em FPGA;
- Design e validação do circuito integrado.

### 3.1 Estudo dos DPDs

A etapa consistia no estudo dos DPDs que foi apresentado no capítulo 2, onde foi feito todo o estudo e levantamento sobre os tipos de modelagem dos DPDs.

### 3.2 Implementação em software

Nesta etapa é feita a implementação propriamente dita do modelo do DPD em software, para isso foi utilizada a linguagem de programação python que é uma linguagem de programação amigável, bastante difundida na comunidade acadêmica e prática de ser utilizada. Para fazer essa modelagem foram coletados sinais de entrada e de saída de um amplificador de potência classe AB, que utiliza um HEMT fabricado em tecnologia GaN. O amplificador foi excitado por um sinal portadora de frequência de 900 MHz e modulado por um sinal de envelope WCDMA 3GPP com cerca de 3,84 MHz de largura de banda. Os dados de entrada e saída do amplificador de potência foram medidos usando um VSA Rohde & Schwarz FSQ com uma taxa de amostragem de 61,44 MHz, disponível em (8). Para tal

### 3.3 Implementação em FPGA

### 3.4 Design e validação

Finalmente, na última etapa, realiza-se o processo de concepção do circuito integrado do DPD como um circuito dedicado integrado na tecnologia BiCMOS 130 nm 8HP, utilizando as ferramentas do Cadence. O fluxo de projeto VLSI para design de

um circuito integrado de aplicação específica, inclui a descrição do circuito em VHDL, síntese lógica utilizando as células padrão da tecnologia, place and route e simulações comportamentais e temporais. O diagrama do fluxo VLSI pode ser ilustrado pela figura 6.

Fonte: (9)

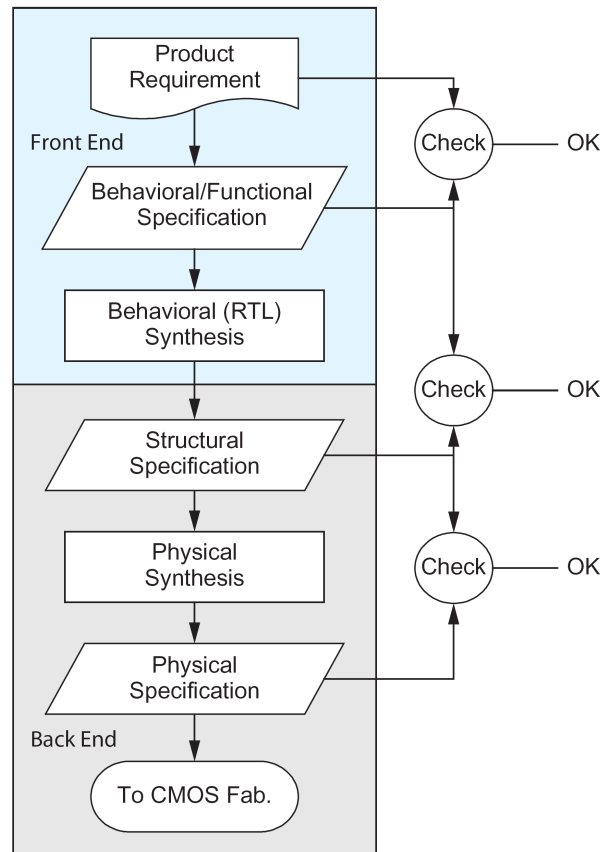


Figura 6 – Fluxo de projeto VLSI

No processo de desenvolvimento do circuito, várias etapas são executadas. Primeiro, há a simulação comportamental para verificar se o circuito VHDL atende às expectativas, utilizando um testbench em VHDL e a ferramenta Cadence NCLaunch. Em seguida, ocorre a síntese lógica, onde a partir do modelo comportamental, utiliza-se a ferramenta Genus para criar um modelo RTL com células padrão de tecnologia específica, considerando restrições de área, frequência e consumo de energia. A síntese gera dois arquivos: um com componentes e conexões, em Verilog, e outro com informações de atraso no formato SDF. A simulação pós-síntese é realizada para validar o netlist gerado, usando o mesmo testbench da simulação comportamental. Em seguida, na etapa de PAR, o layout é criado posicionando as células e realizando as conexões entre essas células, utilizando a ferramenta Innovus. Por fim, na simulação pós-PAR, o circuito é simulado considerando as resistências e capacitâncias parasitas. Cada etapa é fundamental para garantir o correto funcionamento do circuito.

## 4 Resultados e Discussão

Apresente os resultados obtidos aqui.



## 5 Conclusão

Apresente as considerações finais (ou conclusões) do trabalho.

# Referências

- 1 JOHN, E. *Modelagem comportamental de amplificadores de potência de radiofrequência usando termos unidimensionais e bidimensionais de séries de Volterra*. 2016.
- 2 KENINGTON, P. *High Linearity RF Amplifier Design*. [S.l.: s.n.], 2000.
- 3 CRIPPS, S. *RF Power Amplifiers for Wireless Communications*. [S.l.: s.n.], 2006.
- 4 CHAVEZ, J. H. *Estudo comparativo entre as arquiteturas de identificação de pré-distorcedores digitais através das aprendizagens direta e indireta*. 2018.
- 5 PEDRONI, V. *Eletrônica Digital e VHDL*. [S.l.: s.n.], 2010.
- 6 SCHUARTZ, L.; LIMA, E. *Polinômios com Memória de Complexidade Reduzida e sua Aplicação na Pré-distorção Digital de Amplificadores de Potência*. 2017.
- 7 LIMA, E. G. de; GHIONE, G. *Behavioral modeling and digital base-band predistortion of RF power amplifiers*. 2009.
- 8 BONFIM, E. J.; LIMA, E. G. D. *A Modified Two Dimensional Volterra-Based Series for the Low-Pass Equivalent Behavioral Modeling of RF Power Amplifiers*. 2016. 27-35 p.
- 9 H.E.WESTE, N.; HARRIS, D. M. *CMOS VLSI Design: A Circuits and Systems Perspective (4th Edition)*. [S.l.: s.n.], 2010.

# Anexos

## ANEXO A - função que calcula matriz de confusão em python

```

1 def mp(P, M, xn):
2     L = xn.shape
3     XX = np.zeros((L[0] - M, P * (M+1)), dtype=np.complex128)
4     for l in range(M+1, L[0]):
5         for p in range(1, P+1):
6             for m in range(0, M+1):
7                 XX[l-M-1, ((p-1)*(M+1))+m] = (np.abs(xn[l-m])
8                     *(2*p-2)*(xn[l-m]))[0]
9     return XX

```

Anexo: texto ou documento não elaborado pelo autor, que serve de fundamentação, comprovação e ilustração.

ANEXO B - Digite o cabeçalho do anexo