

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
SETOR DE TECNOLOGIA
CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
ÊNFASE EM SISTEMAS EMBARCADOS

CLAYSON G. S. DE OLIVEIRA - GRR20210869

IMPLEMENTAÇÃO EM FPGA DA SATURAÇÃO EM BANDA DUPLA CONCORRENTE
UTILIZANDO FILTROS FIR COM COEFICIENTES OTIMIZADOS PELO MÉTODO DE POWELL
SEGUIDO DA ETAPA DE PRÉ-DISTORÇÃO DIGITAL

ORIENTADOR: PROF. DR. LUIS SCHUARTZ

CURITIBA
2026

CLAYSON G. S. DE OLIVEIRA - GRR20210869

IMPLEMENTAÇÃO EM FPGA DA SATURAÇÃO EM BANDA DUPLA CONCORRENTE
UTILIZANDO FILTROS FIR COM COEFICIENTES OTIMIZADOS PELO MÉTODO DE POWELL
SEGUIDO DA ETAPA DE PRÉ-DISTORÇÃO DIGITAL

Trabalho apresentado como objetivo de descrever o plano de trabalho para a obtenção do grau de Bacharel em engenharia elétrica, com ênfase em sistemas embarcados, do Setor de Tecnologia da Universidade Federal do Paraná.

Orientador: Profº Luis Schuartz, DSc

CURITIBA

2026

Sumário

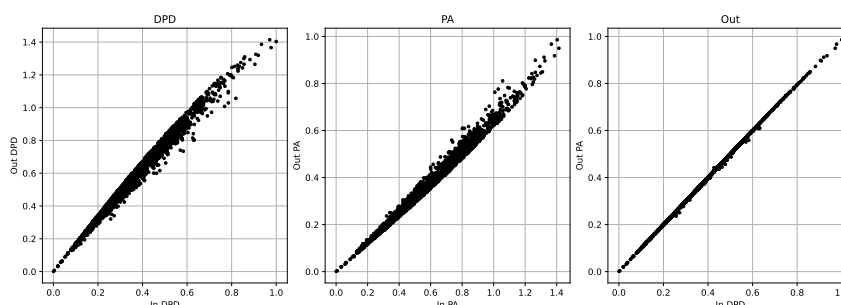
1	INTRODUÇÃO	3
1.1	OBJETIVOS	5
1.1.1	Gerais	5
1.1.2	Específicos	5
2	DESCRIÇÃO DE PROJETO	6
2.1	PÚBLICO ALVO	6
2.2	RECURSOS NECESSÁRIOS	6
2.3	RESULTADOS FUNDAMENTAIS A SEREM ATINGIDOS	6
2.4	CONTRIBUIÇÃO ESPERADA PARA A ÊNFASE E IMPORTÂNCIA PARA A FOR-	
	MAÇÃO DO AUTOR	7
2.5	METODOLOGIA	7
2.5.1	Decomposição e Modelagem do Sistema	7
2.5.2	Otimização e Análise de Precisão	7
2.5.3	Implementação em Hardware (VHDL)	8
2.5.4	Métodos de Validação e Análise de Resultados	8
2.6	CRONOGRAMA	9
	REFERÊNCIAS DE CONSULTA	10

1 INTRODUÇÃO

Com o avanço contínuo da tecnologia nos últimos anos, a comunicação e a transmissão de dados tornaram-se demandas cada vez mais presentes em nossa sociedade para atender às altas taxas de transferência de dados e eficiência dos sistemas mais modernos, especialmente no contexto da comunicação sem fio. Nesse cenário, a transmissão de bandas múltiplas concorrentes - transmissão de dois ou mais sinais ao mesmo tempo - vem sendo uma estratégia adotada para aumentar as taxas de transmissão de dados, reduzir custo e ter uma maior eficiência espectral. Sob essa perspectiva, os amplificadores de potência (PA) desempenham um papel fundamental, pois são responsáveis por amplificar o sinal antes da antena de transmissão, permitindo sua propagação a longas distâncias. Apesar de sua importância, os amplificadores de potência são considerados elementos críticos no sistema, uma vez que consomem uma quantidade significativa de energia, apresentam baixa eficiência e podem introduzir distorções quando operam fora de sua região linear. Na transmissão de sinais, é desejável garantir a linearidade — para preservar a integridade do sinal — e, ao mesmo tempo, alcançar uma boa eficiência energética. Para melhorar a eficiência operacional, é comum utilizar o PA próximo ao seu ponto de saturação. No entanto, essa prática acentua os efeitos de não linearidade, comprometendo a qualidade do sinal transmitido. Para mitigar esses efeitos indesejados, uma das técnicas amplamente adotadas é a pré-distorção digital (DPD), que visa compensar as distorções introduzidas pelo amplificador, restaurando a linearidade do sistema de transmissão.

O DPD é um modelo implementado digitalmente e posicionado antes do amplificador de potência (PA) na cadeia de transmissão. Sua principal função é compensar as não linearidades introduzidas pelo PA, modelando uma função característica inversa àquela do amplificador. Em termos práticos, o DPD introduz uma distorção controlada e deliberada no sinal de entrada, de forma que, após passar pelas não linearidades do PA, o sinal resultante na saída apresente um comportamento mais linear e fiel ao sinal original. Esse processo é fundamental para garantir a integridade espectral do sinal transmitido, reduzindo a distorção harmônica e os produtos de intermodulação, que podem causar interferência em canais adjacentes e violar os requisitos regulatórios de espectro. Além disso, a linearização promovida pelo DPD permite operar o PA em regiões de maior eficiência, próximas à saturação, sem comprometer significativamente a qualidade do sinal, contribuindo para a redução do consumo de energia.

FIGURA 1 – LINEARIDADE DPD E PA

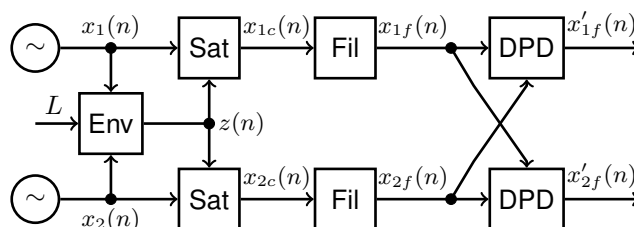


FONTE: AUTOR

Conforme a figura, podemos observar os três estágios principais deste processo: o DPD aplicando a pré-distorção, o PA introduzindo sua distorção natural e, por fim, a saída resultante, que idealmente se aproxima de uma resposta linear. A atuação do DPD como uma função inversa do PA é o que possibilita essa linearização, sendo, portanto, uma técnica essencial para o cumprimento de requisitos de qualidade de transmissão e eficiência energética em sistemas de comunicação modernos. Para operar o amplificador de potência (PA) com níveis de eficiência energeticamente aceitáveis, diversas técnicas são empregadas com o objetivo de otimizar seu desempenho. Dentre essas, destacam-se os métodos voltados à redução da Relação entre Potência de Pico e Potência Média (PAPR, do inglês Peak-to-Average Power Ratio), uma métrica fundamental em sistemas de comunicação.

Uma das abordagens para a mitigação o mesmo consiste na aplicação de técnicas de saturação do sinal, previamente à inserção do mesmo no pré-distorcedor digital (DPD). Essa técnica baseia-se no *hard clipping* do sinal em um determinado limiar de tensão. Quando lidado com um caso de transmissão de banda única, podemos considerar a amplitude do sinal como sendo representada pela envoltória da própria banda, o que simplifica a aplicação da saturação. Já em bandas múltiplas, no caso do presente trabalho sendo representada por um sinal Wi-Fi de 2,4 GHz, e um sinal LTE de 3,5 GHz, a amplitude do sinal é a contribuição de mais de uma banda; com isso, não podemos considerar a amplitude de uma única portadora. Logo, utiliza-se de duas abordagens principais para solucionar essa questão: abordagem da soma e abordagem da divisão. Entretanto, a introdução do processo de saturação pode ocasionar o fenômeno de espalhamento espectral, o qual consiste na expansão do espectro do sinal além da sua largura de banda originalmente designada. Essa expansão pode violar as restrições impostas por órgãos reguladores, resultando na interferência em bandas adjacentes e, conseqüentemente, degradação do desempenho de sistemas vizinhos.

FIGURA 2 – SISTEMA PROPOSTO COM FILTROS.



FONTE: AUTOR

A imagem acima exemplifica a implementação proposta, dado que a saturação do sinal ocasiona um espalhamento espectral, espalhando a frequência além dos limites impostos, a solução é a implementação de um filtro de impulso finito (localizado antes do pré-distorsor) para conter o sinal dentro de uma faixa especificada, para que assim possa ser garantido as regras impostas por normas e para que o sinal não interfira em bandas adjacentes.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Gerais

Implementar em VHDL, utilizando o ambiente Xilinx ISE, um sistema de processamento de sinais para transmissão em banda dupla concorrente (WiFi 2.4 GHz e LTE 3.5 GHz), integrando técnicas de limitação de amplitude e linearização.

1.1.2 Específicos

Para a implementação prática dos objetivos gerais, foram definidas as seguintes etapas:

- Transformar os códigos utilizados para a implementação do trabalho **Otimização de filtros FIR para redução do espalhamento espectral causado pela saturação do sinal em banda dupla concorrente** (Oliveira; Schuartz, 2025b) de forma que utilizem operações básicas (soma, subtração, multiplicação e divisão) e operações digitais para passá-los da linguagem python para VHDL.
- Implementar o bloco de Saturação, filtragem e pré-distorsão em VHDL.
- Validação do funcionamento lógico e desempenho do sistema através de simulações no software ISE e executar o código em uma FPGA na prática.

2 DESCRIÇÃO DE PROJETO

2.1 PÚBLICO ALVO

O público-alvo deste trabalho divide-se em dois âmbitos principais:

- **Âmbito Técnico:** O projeto é direcionado a profissionais e pesquisadores da área de Engenharia Elétrica, com ênfase em sistemas embarcados e telecomunicações, que busquem soluções para a linearização de amplificadores e processamento de sinais em tempo real.
- **Âmbito Social e Ambiental:** De forma indireta, o trabalho beneficia a sociedade em geral por meio do desenvolvimento de tecnologias que aprimoram a infraestrutura de comunicação. A otimização do consumo de potência contribui diretamente para a sustentabilidade ambiental (redução do gasto energético), enquanto a melhoria na transmissão de sinais reflete em serviços de maior qualidade para setores essenciais como saúde (telemedicina), lazer e segurança.

2.2 RECURSOS NECESSÁRIOS

Para a implementação das etapas propostas no objetivo, seria necessário os seguintes recursos:

- 1(um) computador (disponível no GICS)
- Software ISE na versão 14.7(disponível gratuitamente)
- 1(uma) placa de desenvolvimento para programação em VHDL (adquirido individualmente)
- Software Python (disponível gratuitamente)
- Software Cadence Virtuoso (Disponível no GICS)

2.3 RESULTADOS FUNDAMENTAIS A SEREM ATINGIDOS

Para a parte de resultados, o que se espera é obtermos os mesmos resultados apresentados no trabalhos (Oliveira; Schuartz, 2025b), porém agora implementados em uma FPGA. Assim, será avaliado a eficácia do filtro com coeficientes otimizados, que poderão ser comparados

com os resultados já obtidos anteriormente. Também espera-se conhecer a necessidade de hardware de um ASIC, o número de bits de precisão e o consumo de potência do sistema digital pós implementação.

2.4 CONTRIBUIÇÃO ESPERADA PARA A ÊNFASE E IMPORTÂNCIA PARA A FORMAÇÃO DO AUTOR

Como contribuição, este trabalho estabelece um método para minimizar o espalhamento espectral ocasionado pela saturação da envoltória do sinal. Tal abordagem permite que o Amplificador de Potência (PA) opere em sua região de maior eficiência energética, otimizando o desempenho do sistema. Sob a ótica da formação acadêmica, o desenvolvimento deste Trabalho de Conclusão de Curso promove a consolidação dos conhecimentos técnicos adquiridos ao longo da graduação e em atividades de Iniciação Científica (IC). A execução do projeto integra áreas fundamentais como Processamento Digital de Sinais (PDS), Sinais e Sistemas, e programação em Python e VHDL, com foco direto em sistemas embarcados. Assim, o trabalho cumpre o papel de transpor conceitos teóricos para a implementação prática e experimental.

Adicionalmente, a pesquisa oferece uma relevante contribuição científica, não apenas por meio da formação de pessoal qualificado, mas também pela produção intelectual e potencial publicação de artigos científicos.

2.5 METODOLOGIA

A metodologia proposta para este trabalho divide-se em etapas sequenciais que abrangem desde o refinamento teórico e algorítmico até a validação em hardware, conforme as seguintes fases:

2.5.1 Decomposição e Modelagem do Sistema

Inicialmente, o sistema será segmentado em blocos funcionais para facilitar a análise individual de cada componente do método de redução de espalhamento espectral. Nesta etapa, será realizada a conversão de operações aritméticas complexas em representações de números reais equivalentes, visando a compatibilidade com a arquitetura da FPGA.

2.5.2 Otimização e Análise de Precisão

Com o sistema dividido em blocos, será realizada uma análise de quantização para determinar o nível de precisão necessário (número de bits em ponto fixo). O objetivo é otimizar as operações para reduzir o consumo de recursos de hardware sem comprometer a integridade do sinal. As otimizações buscarão o equilíbrio entre o erro de truncamento e a complexidade lógica.

2.5.3 Implementação em Hardware (VHDL)

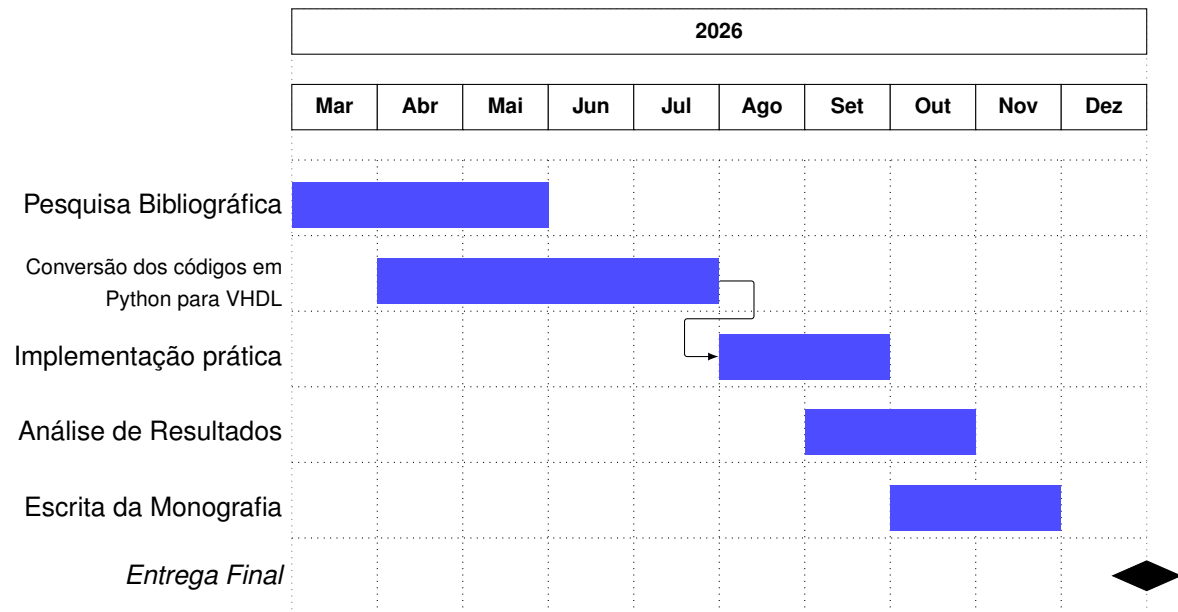
A fase de implementação consistirá na tradução dos modelos desenvolvidos em Python para a linguagem de descrição de hardware VHDL. Utilizando o software ISE 14.7, o sistema será sintetizado para a placa de desenvolvimento, onde a lógica será mapeada em blocos lógicos configuráveis.

2.5.4 Métodos de Validação e Análise de Resultados

Para verificar a eficácia da implementação, serão aplicados métodos de validação quantitativos e qualitativos:

- **Métricas de Erro:** Serão calculados o *Normalized Mean Square Error* (NMSE) e o *Error Vector Magnitude* (EVM) para comparar a fidelidade do sinal processado na FPGA em relação ao modelo de referência.
- **Análise Espectral:** Será avaliada a Densidade Espectral de Potência (PSD) para mensurar a redução do espalhamento espectral e a eficiência do Amplificador de Potência (PA).
- **Métricas de Hardware:** O desempenho do sistema será avaliado quanto ao consumo de área (utilização de LUTs, flip-flops e multiplicadores) e estimativa de consumo de potência, utilizando as ferramentas de análise do software Cadence Virtuoso e ISE.

2.6 CRONOGRAMA



REFERÊNCIAS DE CONSULTA

CHENG, S.-L.; WU, W.-R.; PENG, C.-H.; HSU, C.-J.; LIANG, P. Digital predistortion for concurrent dual-band transmitter using a 2D LUT based method. *In: 2015 IEEE 16th Annual Wireless and Microwave Technology Conference (WAMICON)*. [S. l.: s. n.], 2015. p. 1–4. DOI: [10.1109/WAMICON.2015.7120369](https://doi.org/10.1109/WAMICON.2015.7120369).

HASIN, M. R.; KITCHEN, J. A compact watt-level GaN-on-Si class AB power amplifier for handset applications. *In: 2017 Texas Symposium on Wireless and Microwave Circuits and Systems (WMCS)*. [S. l.: s. n.], 2017. p. 1–4. DOI: [10.1109/WMCaS.2017.8070682](https://doi.org/10.1109/WMCaS.2017.8070682).

JARAUT, P.; ABDELHAFIZ, A.; CHENINI, H.; HU, X.; HELAOUI, M.; RAWAT, M.; CHEN, W.; BOULEJFEN, N.; GHANNOUCHI, F. M. Augmented Convolutional Neural Network for Behavioral Modeling and Digital Predistortion of Concurrent Multiband Power Amplifiers. **IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques**, v. 69, n. 9, p. 4142–4156, 2021. DOI: [10.1109/TMTT.2021.3075689](https://doi.org/10.1109/TMTT.2021.3075689).

LATHI, B. **Sinais e Sistemas Lineares - 2.ed.** [S. l.]: Bookman, 2006. ISBN 9788577803910.

MARTINS, C. M. d. S. **Análise e melhoria da eficiência de amplificadores de potência para aplicações em rádio definido por software**. 2011. Dissertação de Mestrado – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal. Disponível em: <https://repositorio-aberto.up.pt/handle/10216/59438>.

MILIAVACCA, L.; SCHUARTZ, L. Análise dos efeitos da saturação do DPD de banda dupla concorrente. **SeMicro-PR**, jun. 2024.

MORALES ALVARADO, C. E. **Técnica de redução de fator de crista saturada aplicada a amplificadores de potência linearizados por DPD**. 2019. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Paraná, Brasil. Disponível em: <https://acervodigital.ufpr.br/handle/1884/63386>.

OLIVEIRA, C. G. S.; SCHUARTZ, L. FIR Filters for DPD Saturation Improvement. *In: SIM. PROCEEDINGS of Simpósio Sul de Microeletrônica (SIM 2025)*. Curitiba: [s. n.], maio 2025. v. 1, p. 1–5.

OLIVEIRA, C. G. S.; SCHUARTZ, L. Otimização de filtros FIR para redução do espalhamento espectral causado pela saturação do sinal em banda dupla concorrente. *In: EMICRO. ANAIS dos VIII Seminários de Microeletrônica do Paraná*. Curitiba: [s. n.], 2025. v. 8, p. 1–4. Citado 2 vezes nas páginas 5, 6.

OPPENHEIM, A.; SCHAFER, R. **Processamento em Tempo Discreto de Sinais**. [S. l.]: Pearson Universidades, 2013. ISBN 9788581431024.

SCHUARTZ, L. **Saturation Approach for Dual-Band Transmission with Pre-Distortion for PA Efficiency Increase**. Jun. 2018. Diss. (Mestrado) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Brasil. Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica. Disponível em: <https://acervodigital.ufpr.br/xmlui/handle/1884/57039>.

SCHUARTZ, L.; LIMA, E. Saturation Approach for Dual-Band Transmission with Pre-Distortion for PA Efficiency Increase. **Brazilian Archives of Biology and Technology**, v. 67, jun. 2024. DOI: [10.1590/1678-4324-2024230610](https://doi.org/10.1590/1678-4324-2024230610).

SEDRA, A.; SMITH, K. **Microeletrônica**. [S. l.]: Pearson Makron Books, 2000. ISBN 9788534610445.