

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

CLAYSON G. S. DE OLIVEIRA

RELATÓRIO FINAL

ANÁLISE E APLICAÇÃO DE SATURAÇÃO DE DPD DE BANDA DUPLA INCLUINDO FILTROS

Relatório apresentado à Coordenação de Iniciação Científica e Tecnológica da Universidade Federal do Paraná como requisito parcial da conclusão das atividades de Iniciação Científica ou Iniciação em desenvolvimento tecnológico e Inovação - Edital 2025.

Orientador: Prof. Dr. Luis Schuartz

Título do Projeto: Implementação de filtro FIR para reduzir o espalhamento espectral causado pela saturação do DPD

CURITIBA

2025

RESUMO

O desenvolvimento de sistemas eficientes para comunicações sem fio de última geração enfrenta desafios cada vez mais complexos, especialmente no que diz respeito à maximização simultânea da linearidade e da eficiência energética dos transmissores. Esse cenário se torna ainda mais desafiador quando se trata de transmissões de bandas múltiplas concorrentes, como as encontradas em padrões modernos de comunicação sem fio. Para lidar com as não linearidades introduzidas pelos amplificadores de potência (PA), o pré-distorcedor digital (DPD) tem sido amplamente adotado como uma técnica de linearização. No entanto, a eficiência energética dos transmissores ainda é limitada devido às imperfeições inerentes ao processo de modelagem inversa realizado pelo DPD, especialmente em altas potências de saída. Com isso, pesquisas recentes introduziram a saturação do DPD, que permite atingir a eficiência máxima em troca de distorção controlada. Embora a saturação do DPD permita alta eficiência, em cenários de transmissão de bandas múltiplas, o alto crescimento do fundo espectral torna-se a principal limitação dessa técnica. Dessa forma, este trabalho explora o uso de filtros de Resposta ao Impulso Finita (FIR) para redução do fundo espectral causado pela saturação do DPD em cenários de banda dupla concorrente. A filtro foi sintetizado para frequência de corte igual ao dobro da largura de banda, a técnica de janelamento e escolha da ordem foram determinadas buscando a menor banda de transição. Testes foram realizados com Python para desenvolvimento do filtro, Cadence Virtuoso para análise de integrabilidade do sinal e o Octave para análise gráfica. O filtro, implementado com janelamento Hamming e ordem igual a 51 para o canal 1 com IEEE 802.11n a 2,4 GHz, e ordem 81 para o canal 2 com LTE a 3,5 GHz, foi capaz de reduzir significativamente o fundo espectral e chegar aos limites das normas na métrica de densidade espectral de potência (PSD), sem degradação da magnitude do vetor de erro (EVM) e aumento de apenas 0,6 dB na razão de pico de potência para potência média (PAPR).

Palavras-chaves: Pré distorcedor digital; Linearidade; FIR

SUMÁRIO

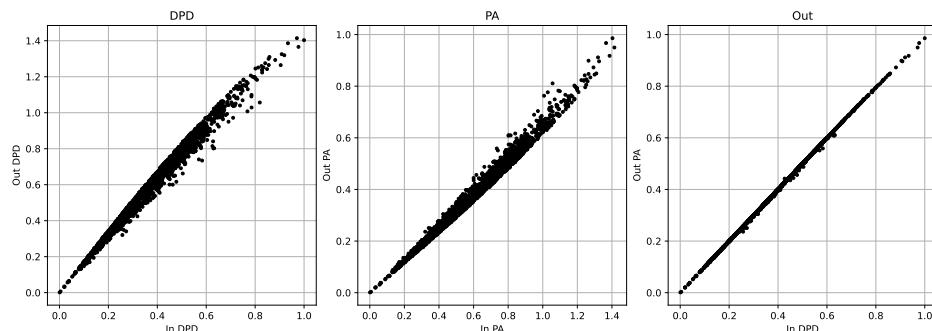
1	INTRODUÇÃO	4
1.1	OBJETIVOS	5
2	REVISÃO DA LITERATURA	6
2.1	SATURAÇÃO	6
2.1.1	Banda única	6
2.1.2	Banda Dupla	7
2.2	FILTROS FIR	8
2.2.1	Projeto de um filtro FIR	9
2.2.2	Ordem do filtro e número de coeficientes	10
2.2.3	Janelamento	11
2.2.4	Parâmetros de qualidade	12
3	MATERIAIS E MÉTODOS	13
3.1	METODOLOGIA	13
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	14
4.1	ANÁLISE NO TEMPO	16
4.2	PAPR E EVM	17
5	CONCLUSÃO	20
	REFERÊNCIAS	21

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(Hasin; Kitchen, 2017). 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 (Martins, 2011), 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)(Jaraut et al., 2021), 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 (Morales Alvarado, 2019) 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

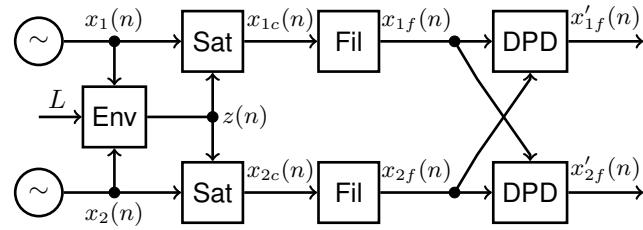


FONTE: AUTOR

Conforme a figura 1, 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, consequentemente, 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

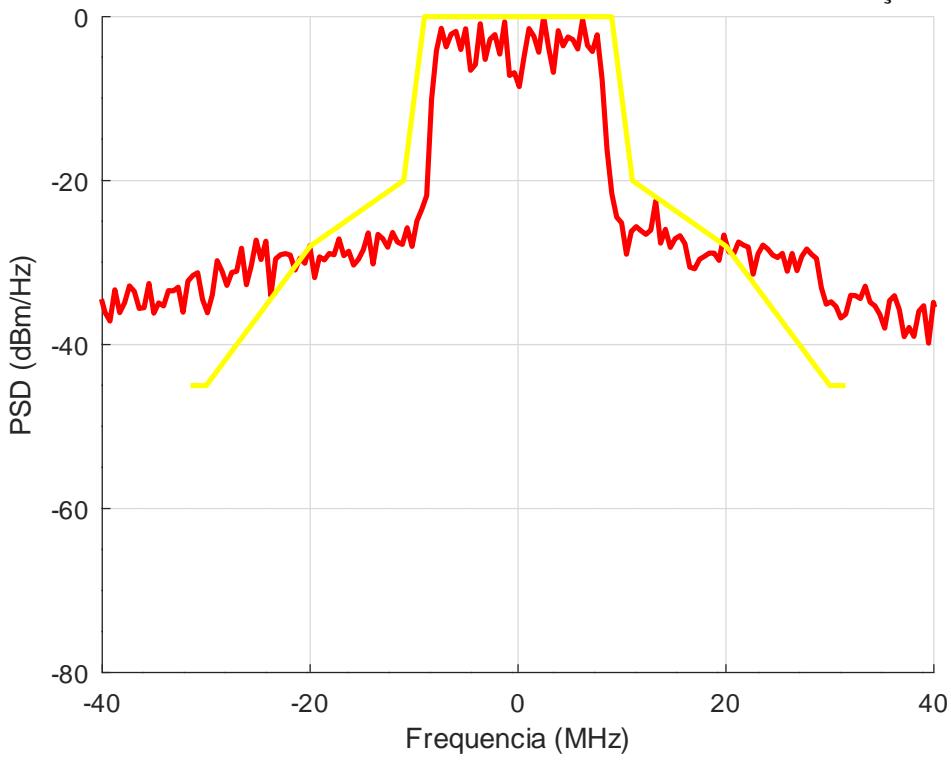
O presente trabalho tem como objetivos principais a implementação de um filtro FIR, com o intuito de mitigar o espalhamento espectral decorrente da saturação do sinal em banda dupla concorrente, e a redução do PAPR do sinal equivalente, o que possibilita o aumento da potência média transmitida.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 SATURAÇÃO

O processo de saturação é uma estratégia utilizada para aumentar a eficiência e o PAPR de saída de um amplificador (PA) (Miliavacca; Schuartz, 2024). Quando os PAs são analisados, percebe-se que a sua maior eficiência se encontra em pontos de alta compressão de ganho, porém distorções são introduzidas quando operando de tal maneira. O problema principal é que amplificadores de potência amplificam o sinal de forma linear até um certo limite; se a potência do sinal de entrada for muito elevada, o próprio amplificador satura (corta esses picos), o que acaba gerando distorções. Dado que a linearização do PA resulta, muitas vezes, em um desempenho melhor do que aquele exigido pelas normas, a tendência é de se ter uma margem de distorção. A saturação do DPD trabalha em cima dessa margem, mirando no aumento de potência média do sinal.

FIGURA 3 – ESPALHAMENTO ESPECTRAL CAUSADO PELA SATURAÇÃO



FONTE: AUTOR

2.1.1 Banda única

No processo de banda única (1D), a saturação é relativamente mais simples, pois, nesse caso, a amplitude do sinal pode ser representada pela própria envoltória de banda base.

$$x_c(n) = \begin{cases} x(n), & \text{se } |x(n)| \leq L \\ L \exp j\angle x(n), & \text{se } |x(n)| > L \end{cases} \quad (2.1)$$

- $x(n)$: É a envoltória equivalente do sinal.
- L : Nível máximo escolhido de amplitude.
- $|x(n)|$: Amplitude instantânea do sinal.
- $\angle x(n)$: Fase instantânea do sinal.

Com a fórmula acima pode-se verificar o processo de saturação ocorrendo. A cada instante n o sistema olha a amplitude do sinal e verifica se a mesma se encontra dentro do limite escolhido L ; se for detectado um sinal menor ou igual, a amplitude original do sinal é preservada. Caso seja detectada uma amplitude maior, o sinal é cortado e forçado a ter uma nova amplitude L . Vale muito bem ressaltar que nesse processo a fase $\angle x(n)$ é preservada; isso é muito importante para não corromper a informação do que está sendo transmitido. O sinal cortado no processo acaba sendo perdido; no fundo o processo de saturação altera a forma de onda, e a informação contida ali é removida, tendo essa energia perdida convertida em distorções. Quando se opta pelo processo de saturação, se acaba tendo um controle do processo, pois ao invés de enviar os picos altos para o amplificador, que então irá saturá-los e ceifá-los, gerando um processo caótico no PA, que pode até mesmo distorcer a fase do sinal, prefere-se controlar esse "achatamento" e manter a fase da informação, mesmo que para isso uma parte do sinal seja perdida.

2.1.2 Banda Dupla

A transmissão em banda dupla (2D) é uma técnica que permite utilizar um único amplificador de potência para transmitir simultaneamente múltiplos canais de comunicação em duas frequências portadoras distintas. Esta abordagem tem ganhado destaque por sua capacidade de suprir as altas taxas de transmissão demandadas pelos sistemas modernos, oferecendo maior eficiência espectral e energética.

O processo de saturação em banda dupla segue os mesmos princípios já estabelecidos para transmissão em banda única. Inicialmente, é realizada a envoltória complexa equivalente, que considera as contribuições de fase e frequência de cada portadora. O sinal resultante pode ser expresso matematicamente pela equação (Schuartz; Lima, 2024):

$$x(n) = x_1(n) \exp \left(\frac{-j\Delta\omega(n-1)}{f_s} \right) + x_2(n) \exp \left(\frac{j\Delta\omega(n-1)}{f_s} \right). \quad (2.2)$$

onde $x_1(n)$ e $x_2(n)$ representam os sinais de banda base dos dois canais, f_1 e f_2 são as frequências portadoras, e f_s é a frequência de amostragem.

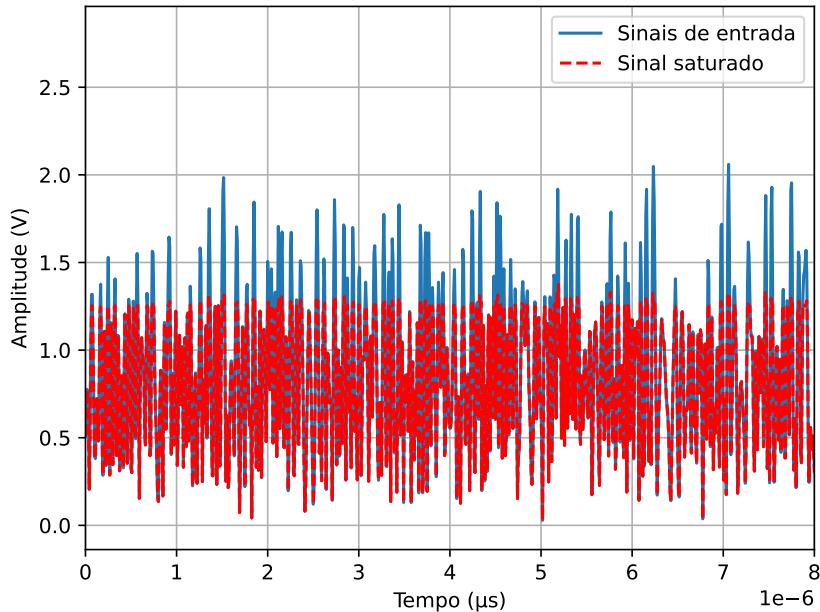
Após o ceifamento do sinal em um limiar L é realizado um procedimento diferente quanto a parte excedente do sinal - aquele que foi cortado. Como já comentado anteriormente, no caso de 1D existe somente uma única portadora, com isso a distorção causada pelo ceifamento acaba por impactar somente aquele sinal. Já em banda dupla é diferente, há dois sinais modulados em frequências diferentes, descartar a parte excedente, nesse caso, impactaria o sinal de uma forma não controlada, podendo gerar intermodulação

entre bandas e até a perda da integridade de cada banda. Para contornar este problema, pode-se utilizar técnicas de reintrodução do excedente nas bandas (Schuartz, 2018). Uma abordagem eficaz é a aplicação da **técnica de repartição proporcional de soma**, definida por:

$$x_{ic}(n) = \begin{cases} x_i(n), & \text{se } |x_i(n)| \leq L \\ \left(\frac{|x_i(n)| - z(n)}{2}\right) \exp(j\angle x_i(n)), & \text{se } |x_i(n)| > L \end{cases} \quad (2.3)$$

Na aplicação da soma, temos a regra de que se a envoltória equivalente for maior que o limiar ($|x(n)| > L$) a amplitude do canal é reduzida subtraindo metade do excedente ($\frac{z(n)}{2}$ sendo $z(n) = |x(n)| - L$) da sua amplitude original $|x_i(n)|$. É importante destacar que a fase do sinal é mantida constante durante este processo, preservando as características espectrais fundamentais dos canais transmitidos. Esta abordagem permite um controle mais refinado da distorção introduzida pelo processo de limitação de amplitude, mantendo a qualidade dos sinais transmitidos em ambas as bandas de frequência.

FIGURA 4 – ENVOLTÓRIA EM BANDA DUPLA SATURADA



FONTE: AUTOR

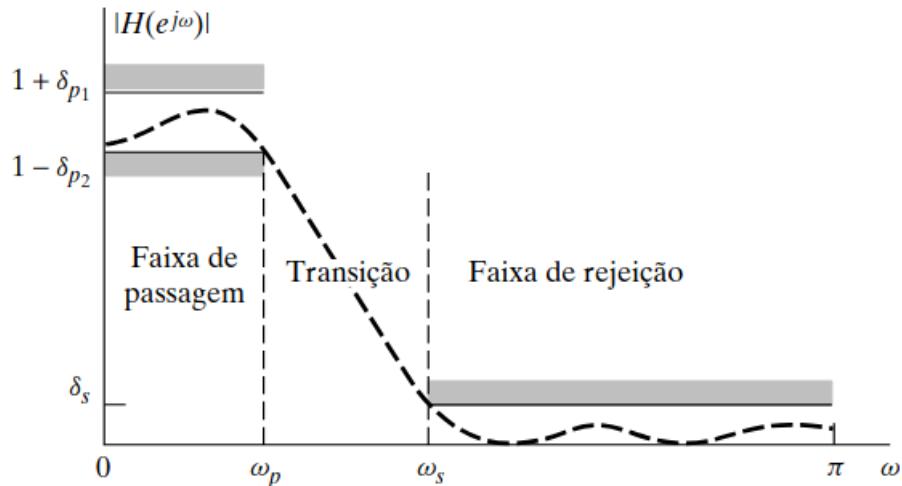
2.2 FILTROS FIR

Quando o tema processamento de sinais é abordado, um tema de suma importância sempre acaba sendo mencionado: filtros seletivos em frequência. Tais componentes são projetados levando em consideração a sua função de permitir a passagem da frequência em um determinado intervalo e rejeitar as demais. Filtros em tempo discreto são algoritmos matemáticos que operam em cima de sinais discretos(sinais amostrados em tempo contínuo), diferente dos filtros analógicos, que lidam com sinais contínuos no tempo usando componentes eletrônicos (Sedra; Smith, 2000). Para um filtro digital, o sinal analógico é primeiro

convertido em uma sequência digital, através de um ADC, que então processada em um filtro; na saída tem-se outra sequência que pode ser convertida para um sinal analógico por um DAC, fazendo o caminho contrário. O funcionamento no seu cerne é regido por equações matemáticas, como convolução, equações diferenciais, transformadas de Fourier, que definem a sua saída, podendo se basear na entrada instantânea ou até mesmo em anteriores (Oppenheim; Schafer, 2013).

Os filtros FIR (*finite impulse response*) são uma classe de filtro que tem como característica sua resposta ao impulso $h[n]$ de duração finita, ou seja, fora de um intervalo finito $h[n]$ é zero. São implementados através de uma equação diferencial linear com coeficientes constantes, que resulta em uma aproximação polinomial da função de sistemas. Sua ordem é denominada pela letra M , e o comprimento, entende-se duração, da resposta ao impulso é $C = M + 1$. Antes de se iniciar o projeto do filtro, é importante estabelecer certas aproximações que regerão o comportamento do mesmo. Conforme a figura 5 é possível ver o comportamento de um filtro passa-baixa (o mesmo que será implementado no presente trabalho); no eixo Y temos a magnitude da resposta em frequência (pode variar de 0 a π) e no eixo X temos a frequência normalizada. Na faixa de passagem temos o intervalo de frequência que queremos manter, que pode ir até a faixa de passagem. Idealmente não deveria se ter atenuação do sinal nessa região, porém na prática o percebe-se é uma ondulação δ_p , conhecida como ripple; assim, para um projeto busca-se ter variações pequenas nessa faixa. Logo depois vem a faixa de transição, que ocorre de forma gradual, ou seja, tem-se um certo intervalo de tempo para que o filtro possa atenuar o sinal desejado. Por último vem a faixa de rejeição, responsável por rejeitar a frequência não desejada; idealmente serial possível atenuar por completo, na realidade são atenuadas, porém não bloqueadas por completo, tendo uma faixa de rejeição limitada por um ripple δ_r .

FIGURA 5 – TRANSIÇÃO DE UM FILTRO DIGITAL PASSA-BAIXA



FONTE: (Oppenheim; Schafer, 2013)

2.2.1 Projeto de um filtro FIR

O método abordado neste trabalho para o projeto do filtro de resposta ao impulso finito (FIR) foi baseado no *método do janelamento*. Tal abordagem se inicia com uma resposta em frequência desejada, que pode ser representada por uma série de Fourier como:

$$H_d(e^{j\omega}) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} h_d[n] e^{-j\omega n} \quad (2.4)$$

A equação acima indica que, conhecendo-se a sequência de resposta ao impulso $h_d[n]$, pode-se determinar sua forma em frequência $H_d(e^{j\omega})$ por meio da soma de todas as amostras multiplicadas pelas exponenciais complexas $e^{-j\omega n}$. A resposta ao impulso ideal, por sua vez, pode ser obtida a partir de $H_d(e^{j\omega})$ através da transformada inversa de Fourier discreta, dada por:

$$h_d[n] = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} H_d(e^{j\omega}) e^{j\omega n} d\omega \quad (2.5)$$

As equações acima formam um par transformada-inversa, isto é, uma é o inverso da outra. Como na prática não é possível ter n variando de $-\infty$ até ∞ , utiliza-se um processo de truncamento de $h_d[n]$ para obter um filtro FIR causal e de duração finita. Esse truncamento é realizado multiplicando-se $h_d[n]$ por uma função *janela* $w[n]$, resultando em:

$$h[n] = h_d[n] w[n] \quad (2.6)$$

No domínio da frequência, essa operação de multiplicação no tempo corresponde a uma convolução entre a resposta em frequência ideal $H_d(e^{j\omega})$ e a transformada de Fourier da janela $W(e^{j\omega})$ (Lathi, 2006). Como $W(e^{j\omega})$ apresenta um *lóbulo principal* e vários *lóbulos laterais*, o efeito do janelamento é suavizar a transição entre as regiões de passagem e rejeição do filtro (aumentando a largura da banda de transição), e introduzir ondulações(*ripples*) na banda de passagem e na banda de rejeição.

Em termos práticos:

- Janelas mais largas no tempo \Rightarrow lóbulos principais mais estreitos \Rightarrow transição mais abrupta na frequência.
- Janelas com menor nível de lóbulos laterais \Rightarrow menor ondulação na resposta em frequência.

Assim, a escolha da janela (retangular, Hamming, Hann, Blackman, etc.) define o compromisso entre largura da banda de transição e nível de rejeição fora da banda.

2.2.2 Ordem do filtro e número de coeficientes

No contexto de filtros FIR, a ordem do filtro M está diretamente relacionada ao número de coeficientes C por:

$$C = M + 1$$

A ordem M representa o maior atraso (em amostras) presente no filtro. Quanto maior M , mais estreita será a banda de transição e maior a capacidade de rejeitar frequências indesejadas. No entanto, filtros de maior ordem também possuem mais coeficientes, o que implica:

- **Maior custo computacional:** cada saída do filtro requer C multiplicações e $(C - 1)$ somas.
- **Maior latência:** o tempo de resposta aumenta, o que pode ser crítico em aplicações de tempo real.

- **Maior uso de memória:** é necessário armazenar mais amostras anteriores para o cálculo da saída.

Assim, o projeto do filtro requer um equilíbrio entre desempenho espectral (largura da transição e rejeição fora de banda) e custo de implementação (processamento e memória). A escolha adequada de M e da janela $w[n]$ permite equilibrar essas necessidades conforme a aplicação.

2.2.3 Janelamento

O projeto de filtros digitais frequentemente parte de um filtro ideal, cuja resposta em frequência possui uma transição perfeitamente abrupta entre a banda de passagem e a banda de rejeição. Um filtro ideal, no entanto, exige uma resposta ao impulso, $h_d[n]$, de comprimento infinito, o que o torna impraticável para implementação em sistemas reais. O *método de janelamento* é uma técnica utilizada para obter uma resposta ao impulso finita (FIR) a partir de uma resposta ao impulso ideal infinita (IIR).

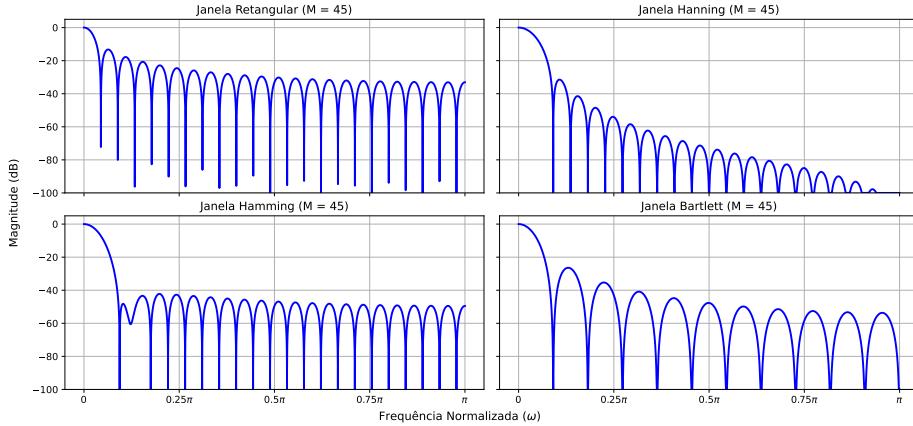
A abordagem mais direta para tornar a resposta ao impulso finita é o *truncamento*, que consiste em manter apenas os M coeficientes centrais de $h_d[n]$ e zerar todos os outros. Embora simples, o truncamento abrupto introduz efeitos indesejáveis no domínio da frequência. A multiplicação no domínio do tempo corresponde a uma convolução no domínio da frequência.

Para mitigar os efeitos, utilizam-se funções de janela que possuem uma transição mais suave de um para zero em suas bordas (Oppenheim; Schafer, 2013). Essas janelas "suavizadas" reduzem a amplitude das descontinuidades no início e no fim do sinal, o que resulta em lóbulos laterais com menor energia na frequência. No entanto, a escolha de uma janela implica em uma troca fundamental entre a resolução em frequência e a supressão do vazamento espectral. Geralmente, janelas que oferecem maior atenuação nos lóbulos laterais o fazem ao custo de um lóbulo principal mais largo, e vice-versa.

Existem diversas janelas aplicadas ao contexto de filtragem de sinais, cada uma oferecendo um equilíbrio diferente nesta troca. Algumas das mais comuns incluem:

- **Retangular:** Possui o lóbulo principal mais estreito (melhor resolução), mas a pior atenuação de lóbulo lateral (maior vazamento espectral).
- **Hanning e Hamming:** Oferecem um bom compromisso entre resolução e atenuação. Elas reduzem significativamente o vazamento espectral em comparação com a janela retangular, ao custo de um lóbulo principal aproximadamente duas vezes mais largo.
- **Bartlett (Triangular):** Apresenta uma atenuação de lóbulo lateral melhor que a retangular, mas pior que a de Hanning e Hamming.
- **Blackman:** Proporciona uma excelente atenuação de lóbulo lateral, mas com um lóbulo principal ainda mais largo, sacrificando mais a resolução em frequência.

FIGURA 6 – JANELAS NO DOMÍNIO DA FREQUÊNCIA



FONTE: AUTOR

2.2.4 Parâmetros de qualidade

O primeiro parâmetro utilizado para análise da qualidade da implementação no sistema é o PAPR. Com essa análise a relação da potência de pico do sinal em relação a sua potência média, em termos matemáticos:

$$\text{PAPR}_{\text{dB}} = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{\max(|x[n]|^2)}{E[|x[n]|^2]} \right) \quad (2.7)$$

Na análise, é buscado uma diminuição do valor do PAPR, pela equação é possível perceber que a relação é inversamente proporcional ao valor da potência média, como seu aumento é o desejado, esperá-se ter uma redução do valor final, normalmente medido em decibéis.

O segundo parâmetro analisado é o de EVM, magnitude do vetor de erro, sua métrica mede a diferença entre o sinal ideal, que deveria se ter, e o sinal real. Sua visualização é dada a partir de um diagrama de constelações, uma representação visual dos símbolos de um sinal digital. Em um sistema ideal, cada ponto de dados estaria exatamente em sua posição perfeita no diagrama, mas devido a imperfeições no sistema, tais pontos se encontram em uma posição deslocada da ideal. O vetor de erro é o vetor que liga o ponto real ao seu ponto ideal correspondente.

$$\text{EVM}_{\text{RMS}} = \sqrt{\frac{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N |S_{\text{real}}[n] - S_{\text{ideal}}[n]|^2}{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N |S_{\text{ideal}}[n]|^2}} \quad (2.8)$$

O EVM leva em conta diversas imperfeições do sinal, dentre elas: Ruido de fase, distorções de amplitude e fase, vazamento de portadora. Quanto menor o valor, fica indicado que o sinal transmitido ou recebido é muito próximo do ideal. Em contrapartida, um EVM alto sugere que muitas imperfeições estão presentes no sinal, o que pode levar a erros na decodificação do mesmo.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo descreve as ferramentas e etapas empregadas no desenvolvimento do trabalho, com foco nos recursos computacionais utilizados e na metodologia adotada para o tratamento e análise dos sinais. Os materiais utilizados consistem em ferramentas computacionais, com destaque para a linguagem de programação Python, escolhida para a implementação do comportamento de saturação do DPD. Foram utilizadas bibliotecas amplamente reconhecidas na comunidade científica, como NumPy, Matplotlib, SciPy e Pandas, que proporcionam suporte ao processamento numérico, visualização gráfica e manipulação de dados.

Os dados utilizados foram fornecidos pela universidade, sendo obtidos por meio da plataforma Spectre RF da Cadence Virtuoso. Esses dados incluem sinais nos padrões LTE e Wi-Fi. O tratamento dos sinais envolveu diversas etapas, como a construção da envoltória equivalente (implementada em Python), aplicação de saturação, e uso de filtros digitais. Para isso, foram empregadas funções da biblioteca SciPy, como `ifilter` e `firwin`. Toda a codificação foi realizada na IDE *PyCharm*, garantindo organização e eficiência no desenvolvimento.

A visualização dos resultados foi feita com o auxílio da ferramenta Octave — uma alternativa de código aberto ao MATLAB —, utilizada principalmente para a plotagem e análise gráfica das respostas ao janelamento aplicado. Para a avaliação da qualidade do filtro proposto, foi analisado o erro vetorial médio (EVM), cuja extração foi realizada diretamente na plataforma Spectre RF da Cadence Virtuoso, que já incorpora essa funcionalidade, o que facilitou a obtenção dos resultados.

3.1 METODOLOGIA

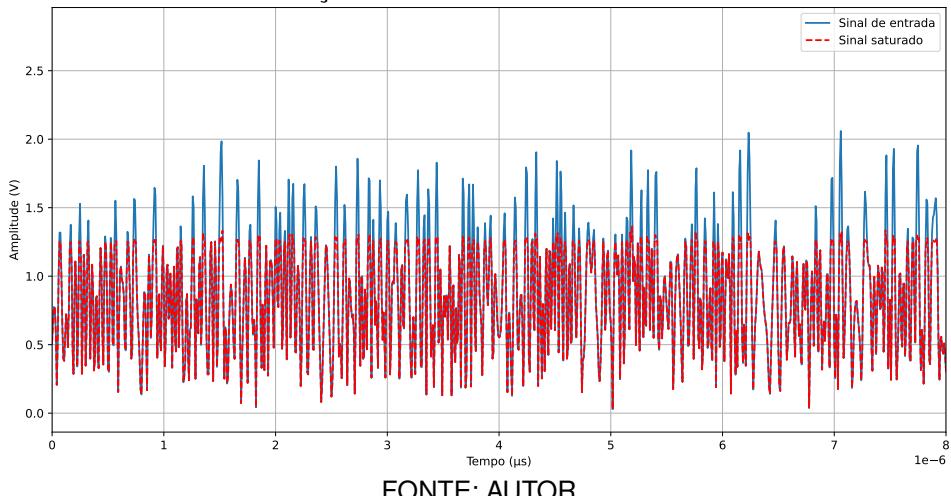
A seguir, apresenta-se a sequência de etapas executadas para a obtenção dos resultados deste trabalho:

1. **Aquisição dos dados:** Realizada no Spectre RF da Cadence Virtuoso, considerando sinais com largura de banda de 20 MHz, frequência de amostragem de 120 MHz e nos padrões LTE e Wi-Fi.
2. **Tratamento dos sinais em Python:** As etapas incluíram:
 - Interpolação e reamostragem dos sinais;
 - Definição dos parâmetros dos filtros;
 - Cálculo da envoltória equivalente;
 - Aplicação do modelo de saturação;
 - Separação do sinal pelo método da soma;
 - Aplicação de filtros digitais via janelamento;
 - Geração dos arquivos de saída no formato `.csv`.
3. **Análise e visualização dos resultados:** Realizadas no Octave, com foco na interpretação gráfica do comportamento dos sinais após o processamento.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para a aplicação e aquisição dos resultados, utilizou-se de dois sinais com largura de banda de 20 MHz e amostrados a uma frequência de 120 MHz: o sinal wifi, no padrão 802.11(2,4 GHz) e o sinal LTE (3,5 GHz). Na implementação da saturação, foi atribuído um limiar L igual a 1.25V, escolhido de forma a maximizar a largura de banda resultante do nosso sinal pós filtro, sendo esse o valor limite que permitiu que o sinal resultante se encontrasse sob o limiar.

FIGURA 7 – SATURAÇÃO APLICADA A ENVOLTÓRIA EQUIVALENTE



FONTE: AUTOR

Nas figuras 8 e 9 é possível identificar, através de um gráfico de densidade de potência média, a atuação do filtro na atenuação do espalhamento espectral. Em ambos os gráficos o contorno em amarelo indica os limites impostos por normas, os mesmos que não se devem ultrapassar; também é possível notar que em apenas a linha vermelha acaba por ultrapassar os limites, tal linha representa o sinal saturado.

A atuação do filtro é clara, cada janelamento possui uma característica na transição do sinal, e ao comparar diversos é possível identificar como cada um responde. Em cada caso o sinal saturado é atenuado a tal ponto que possibilita que o sinal fique enclausurado e respeite as normas regulamentadoras. Nas configurações do filtro, no momento de projeto para aplicação, a escolha da ordem, e consequentemente do número de coeficientes, foi arbitrária. Para os resultados apresentados, optou-se nas janelas do sinal Wifi uma ordem de 50, e para o do sinal LTE de 80. Com a diferença de 30 na ordem dos filtros, é possível notar que no caso do LTE o janelamento é levemente mais abrupto, devido a justamente ter um número de coeficientes maior.

Ao analisar a característica de cada janelamento temos que as janelas Bartlett e triangular apresentam uma atenuação mais sutil, quando comparado as demais. Tomando como exemplo o Hamming, é possível ver que sua resposta acaba sendo mais limitante, reduzindo o sinal saturado a um frequência de corte próxima dos 20 MHz, estabelecida *a priori*. Levando isso em conta, para os cálculos de PAPR e EVM que se seguem, foi utilizado o janelamento Hamming como exemplo para as análises.

FIGURA 8 – FILTRO FIR NO SINAL WIFI

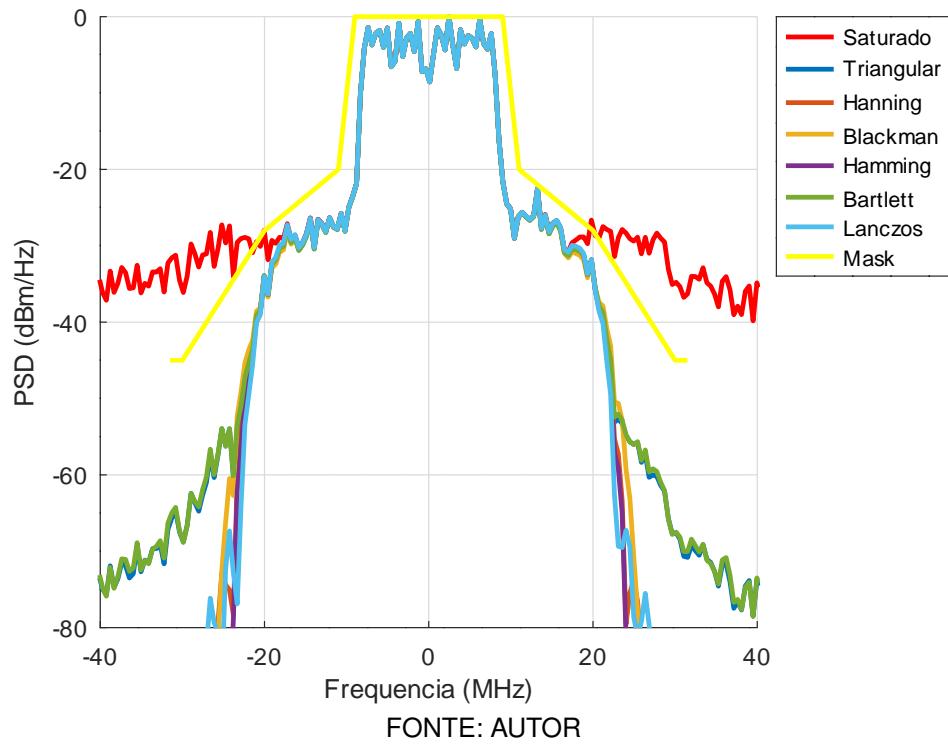
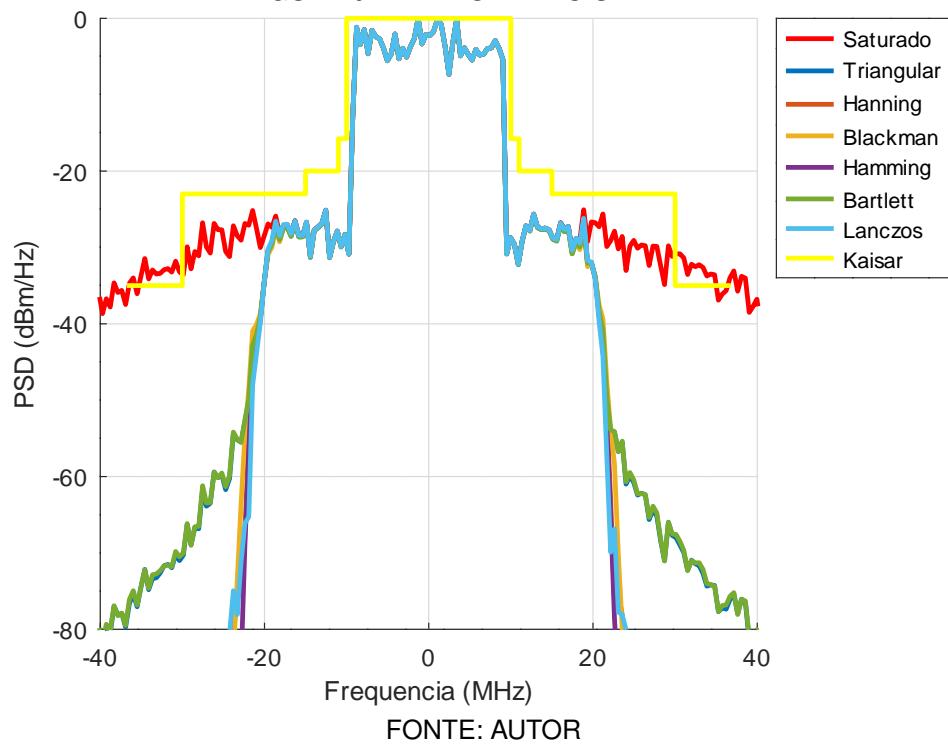


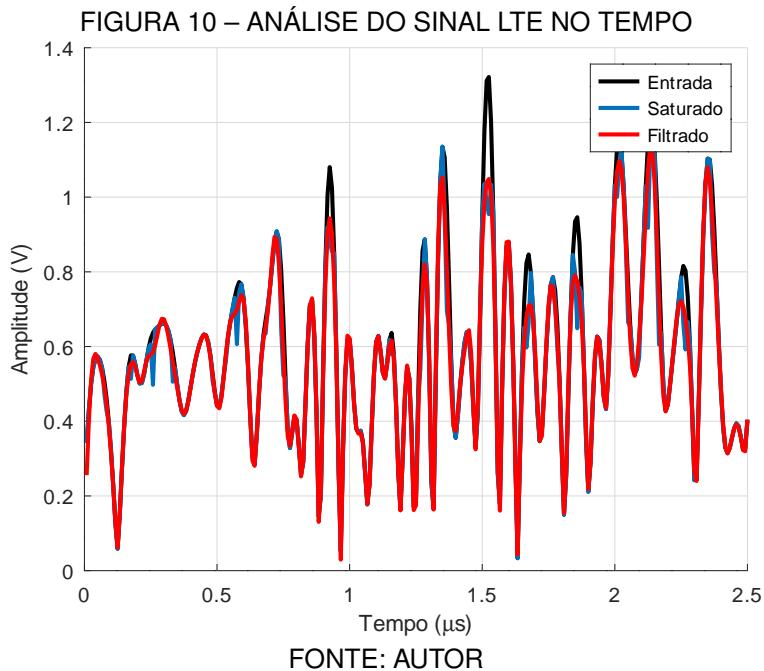
FIGURA 9 – FILTRO FIR NO SINAL LTE



4.1 ANÁLISE NO TEMPO

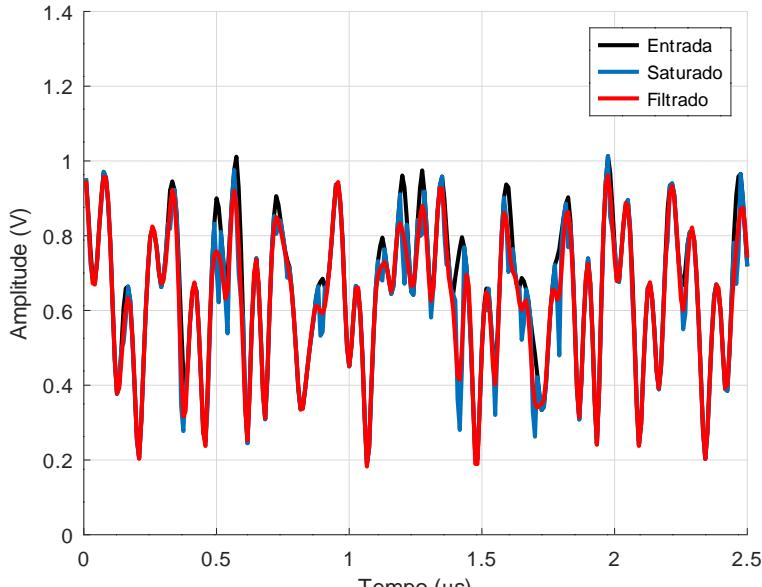
Para a análise no domínio do tempo, observa-se que a fase do sinal permanece constante ao longo de todo o processo, garantindo que a informação modulada não tenha sido comprometida. Conforme ilustrado na figura 10 e na figura 11, o formato da onda se mantém inalterado nos três estágios avaliados — sinal de entrada, sinal saturado e sinal filtrado. A única modificação perceptível ocorre na amplitude, que é reduzida após a aplicação da saturação e, posteriormente, suavizada pelo filtro.

No caso do sinal LTE, a redução de amplitude é mais gradual, com transições suaves entre os três estágios, evidenciando uma menor distorção instantânea. Já no sinal WiFi, embora o formato da onda também seja preservado, a saturação provoca cortes mais abruptos nos picos de amplitude, que são atenuados pela filtragem subsequente. Essa diferença decorre da natureza espectral e temporal distinta entre as duas formas de modulação.



A preservação do formato temporal em ambos os casos confirma que o processamento aplicado atua majoritariamente na magnitude do sinal, sem introduzir distorções significativas na fase. Além disso, a filtragem desempenha papel importante na mitigação dos efeitos adversos da saturação, garantindo conformidade com requisitos espetrais ao mesmo tempo em que preserva a integridade da informação transmitida.

FIGURA 11 – ANÁLISE DO SINAL WIFI NO TEMPO



FONTE: AUTOR

4.2 PAPR E EVM

Na análise dos fatores de qualidade do sinal, a Tabela 1 apresenta as variações observadas no PAPR nas três etapas do processo: sinal original (sem saturação), sinal saturado e sinal filtrado. É importante destacar que, devido à eficácia do filtro em atenuar o espalhamento espectral provocado pela saturação, espera-se uma redução no valor de PAPR, o que, por consequência, leva ao aumento da potência média do sinal.

Observando os resultados, nota-se que para o *Canal 1* o PAPR sofre um pequeno aumento na etapa de saturação (de 8,43 dB para 8,89 dB), possivelmente devido a alterações pontuais na forma de onda que ampliam momentaneamente a razão entre o pico e a potência média. Após a filtragem, o valor retorna para 8,35 dB, praticamente igual ao valor original, evidenciando que o processo remove os excessos introduzidos pela saturação.

No *Canal 2*, a tendência é diferente: o PAPR já sofre redução na etapa de saturação (8,24 dB para 8,03 dB) e cai ainda mais após a filtragem (7,27 dB), indicando que tanto a saturação quanto o filtro contribuem para a suavização dos picos de amplitude.

Já na *Envoltória Equivalente*, observa-se a maior variação, com o PAPR caindo de 9,09 dB no sinal original para apenas 5,28 dB após a saturação, e subindo levemente para 5,90 dB depois da filtragem. Essa redução significativa indica que a saturação limita fortemente os picos de amplitude, diminuindo a variabilidade instantânea do sinal. Embora a filtragem cause um pequeno aumento, este pode ser atribuído à recomposição de componentes espectrais necessárias para manter a integridade da informação.

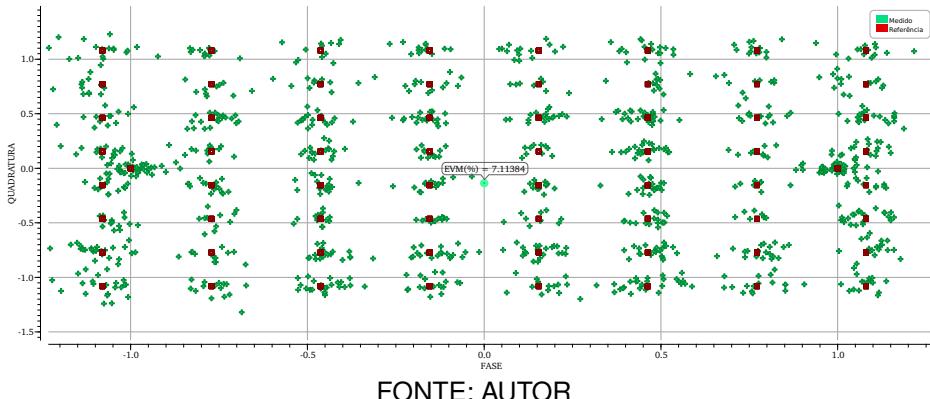
Do ponto de vista de eficiência do amplificador de potência, essas reduções no PAPR — especialmente na envoltória equivalente — são vantajosas, pois permitem operar mais próximo do ponto de saturação sem introduzir distorções excessivas.

TABELA 1 – Resultados de PAPR para os canais 1, 2 e para a envoltória equivalente, considerando as condições: sem saturação, saturado e filtrado

	PAPR Canal 1	PAPR Canal 2	PAPR Envoltória Eq.
Sem saturação	8,43 dB	8,24 dB	9,09 dB
Saturado	8,89 dB	8,03 dB	5,28 dB
Filtrado	8,35 dB	7,27 dB	5,90 dB

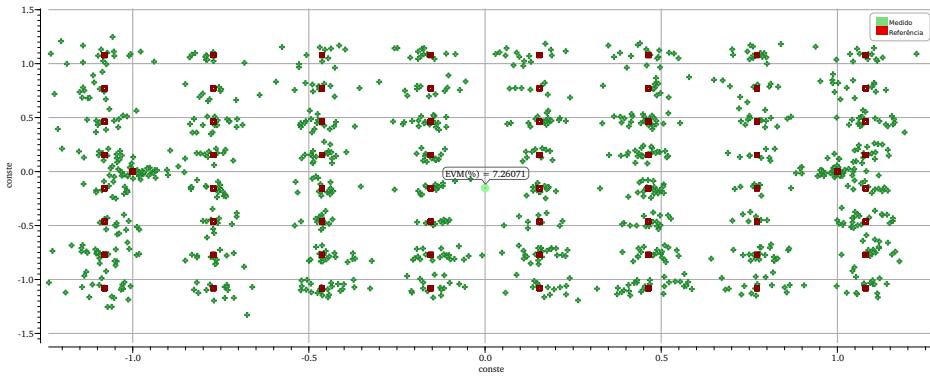
Para a análise da magnitude do vetor de erro, as imagens abaixo comparam os resultados do sinal de referência e o real, aquele que foi retirado após a aplicação do filtro. Para o sinal Wi-Fi, a aplicação do filtro mostrou-se perceptível. Sem o filtro, o EVM medido foi de 7,2607%, conforme a figura 13, enquanto que com a aplicação do filtro o valor reduziu-se para 7,1138%, conforme a figura 12. Embora a diferença ainda seja relativamente pequena, observa-se uma melhora mais evidente quando comparado ao LTE. Isso indica que, para o Wi-Fi, a filtragem contribuiu de maneira mais efetiva para a melhoria da qualidade do sinal.

FIGURA 12 – EVM DO SINAL WIFI COM FILTRO



FONTE: AUTOR

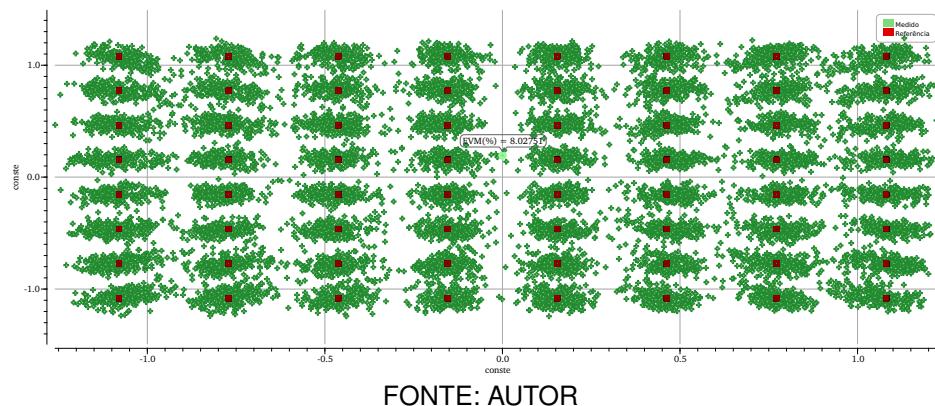
FIGURA 13 – EVM DO SINAL WIFI SEM FILTRO



FONTE: AUTOR

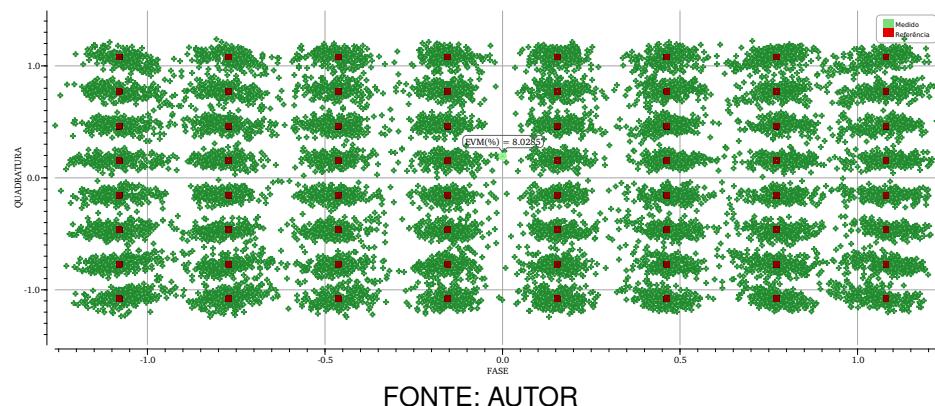
Para o sinal LTE, o valor de EVM sem a aplicação do filtro foi de 8,0285%, conforme a figura 15, enquanto que, após a aplicação do filtro, observou-se uma leve redução para 8,0275%, conforme a figura 14. Essa diferença é muito pequena, indicando que o processo de filtragem praticamente não alterou o desempenho em termos de erro vetorial neste caso. Isso sugere que o filtro atuou de forma eficiente na contenção do espectro, sem introduzir distorções significativas na constelação do sinal LTE.

FIGURA 14 – EVM DO SINAL LTE COM FILTRO



FONTE: AUTOR

FIGURA 15 – EVM DO SINAL LTE SEM FILTRO



FONTE: AUTOR

TABELA 2 – Resultados dos testes de EVM em ambos os canais

	Com filtro	Sem filtro
Canal 1	7.1138%	7.2607%
Canal 2	8.0275%	8.0285%

De forma geral, os resultados confirmam que a aplicação do filtro cumpre seu papel de mitigar o espalhamento espectral sem comprometer a qualidade do sinal em termos de EVM. Em particular, o ganho observado no Wi-Fi evidencia a relevância do uso de técnicas de filtragem para sistemas que operam em canais mais suscetíveis a interferências adjacentes. Por outro lado, no LTE, a variação praticamente desprezível sugere que o sistema já apresentava robustez suficiente, sendo menos impactado pela presença ou ausência de filtragem.

5 CONCLUSÃO

Na transmissão de sinais, cada vez mais essencial na sociedade contemporânea, a obtenção de uma saída linear e eficiente configura-se como um objetivo de grande relevância. A implementação de um filtro FIR digital no sistema DPD + PA contribui significativamente para o aumento da eficiência, sobretudo quando associado a métodos de saturação do pré-distorcedor. Essa etapa adicional permite que o amplificador opere mais próximo da região de saturação, resultando em um aumento da potência média durante o funcionamento.

Os resultados apresentados evidenciam que a adição do filtro implica em uma redução do pico de potência média, ao compararmos a envoltória equivalente do sinal sem saturação com aquela obtida após o processo de filtragem. Observa-se ainda que, embora exista um acréscimo de aproximadamente 0,6 dB entre os sinais saturado e filtrado, essa diferença não exerce impacto significativo no desempenho final do sistema.

No que se refere ao EVM, os resultados indicam que não há degradação relevante na qualidade do sinal, mantendo-o próximo ao valor ideal. Mesmo considerando que as simulações foram conduzidas apenas com o janelamento Hanning, os resultados obtidos permitem concluir que a implementação do filtro FIR exerce um efeito positivo no desempenho global do sistema.

REFERÊNCIAS

- 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.I.: s.n.], 2017. P. 1–4. DOI: [10.1109/WMCaS.2017.8070682](https://doi.org/10.1109/WMCaS.2017.8070682). Citado 1 vez na página 4.
- JARAUT, P.; ABDELHAFIZ, A.; CHENNINI, 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). Citado 1 vez na página 4.
- LATHI, B. **Sinais e Sistemas Lineares - 2.ed.** [S.I.]: Bookman, 2006. ISBN 9788577803910. Citado 1 vez na página 10.
- 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>. Citado 1 vez na página 4.
- MILIAVACCA, L.; SCHUARTZ, L. Análise dos efeitos da saturação do DPD de banda dupla concorrente. **SeMicro-PR**, jun. 2024. Citado 1 vez na página 6.
- 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>. Citado 1 vez na página 4.
- OPPENHEIM, A.; SCHAFER, R. **Processamento em Tempo Discreto de Sinais**. [S.I.]: Pearson Universidades, 2013. ISBN 9788581431024. Citado 2 vezes nas páginas 9, 11.
- 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>. Citado 1 vez na página 8.
- 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). Citado 1 vez na página 7.
- SEDRA, A.; SMITH, K. **Microeletrônica**. [S.I.]: Pearson Makron Books, 2000. ISBN 9788534610445. Citado 1 vez na página 8.