

# Análise e aplicação de saturação de DPD de banda dupla incluindo filtros

Clayson G. S. de Oliveira<sup>1</sup>, Luis Schuartz<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Departamento de engenharia elétrica, Universidade Federal do Paraná (UFPR)

<sup>2</sup>Group of Integrated Circuits and Systems (GICS)  
clayson@ufpr.br

## Resumo

O desenvolvimento de sistemas sem fio de última geração exige alta linearidade e eficiência energética, desafio intensificado em transmissões de bandas múltiplas concorrentes. Amplificadores de potência (PA), embora essenciais, introduzem não linearidades que degradam a qualidade do sinal. A pré-distorção digital (DPD) é amplamente usada para mitigá-las, mas limita a otimização da eficiência por limitação da modelagem. Nesse cenário, a saturação do DPD surge como alternativa para ampliar a eficiência, ainda que com aumento do fundo espectral, especialmente em sistemas de bandas múltiplas concorrentes.

Este trabalho avalia o uso de filtros FIR para conter esse crescimento espectral em transmissões de banda dupla. Projetados com frequência de corte igual ao dobro da largura de banda e ordem otimizada por janelamento, os filtros Hamming — ordem 51 para IEEE 802.11n (2,4 GHz) e ordem 81 para LTE (3,5 GHz) — reduziram significativamente o fundo espectral. As simulações em Python, Cadence Virtuoso e Octave confirmam a conformidade com limites de PSD, preservação do EVM e apenas um acréscimo de 0,6 dB no PAPR, demonstrando a eficácia da proposta.

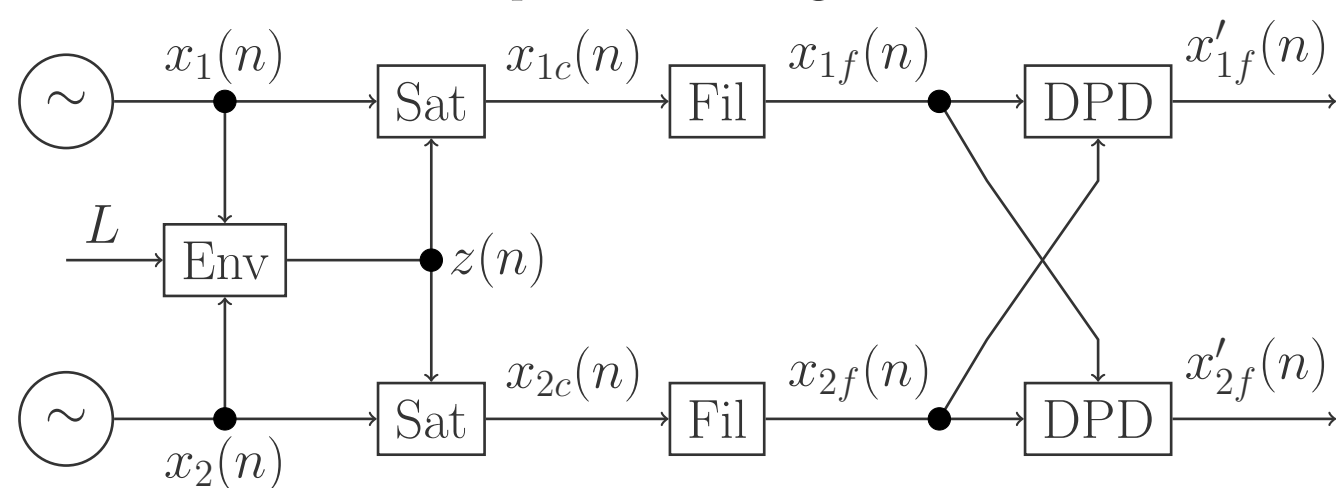
**Palavras-chave:** DPD, saturação, filtros FIR, banda dupla, eficiência espectral

## Introdução

Atualmente, sistemas sem fio como 4G e 5G exigem alta eficiência espectral, linearidade e baixo consumo. A complexidade cresce em transmissões em bandas múltiplas concorrentes e multiprotocolo, onde o amplificador de potência (PA) é o principal responsável pelo consumo e distorções, compensadas pelo pré-distorcedor digital (DPD). Porém, limitar a amplitude reduz a eficiência do sistema. A técnica de saturação do DPD aplica um corte no limiar  $L$ , mantendo a fase e elevando a eficiência, mas em banda dupla aumenta o piso de ruído, demandando soluções adicionais.

A Figura 1 ilustra a cadeia de processamento proposta, destacando a saturação, filtragem e aplicação do DPD para sinais concorrentes.

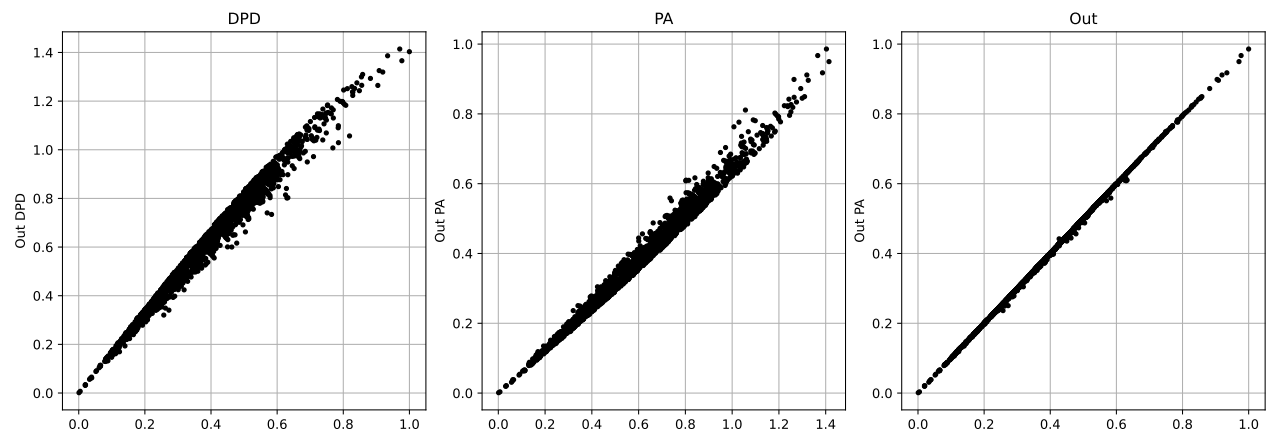
**Figura 1:** Cadeia de processamento proposta para o sistema de DPD de banda dupla com filtragem.



FONTE: AUTOR

Já a Figura 2 mostra experimentalmente a relação entre entrada e saída do PA e do DPD, evidenciando a importância da linearização para manter o sinal dentro das normas espectrais.

**Figura 2:** Característica de linearidade do PA e do sistema com DPD.



FONTE: AUTOR

## 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.

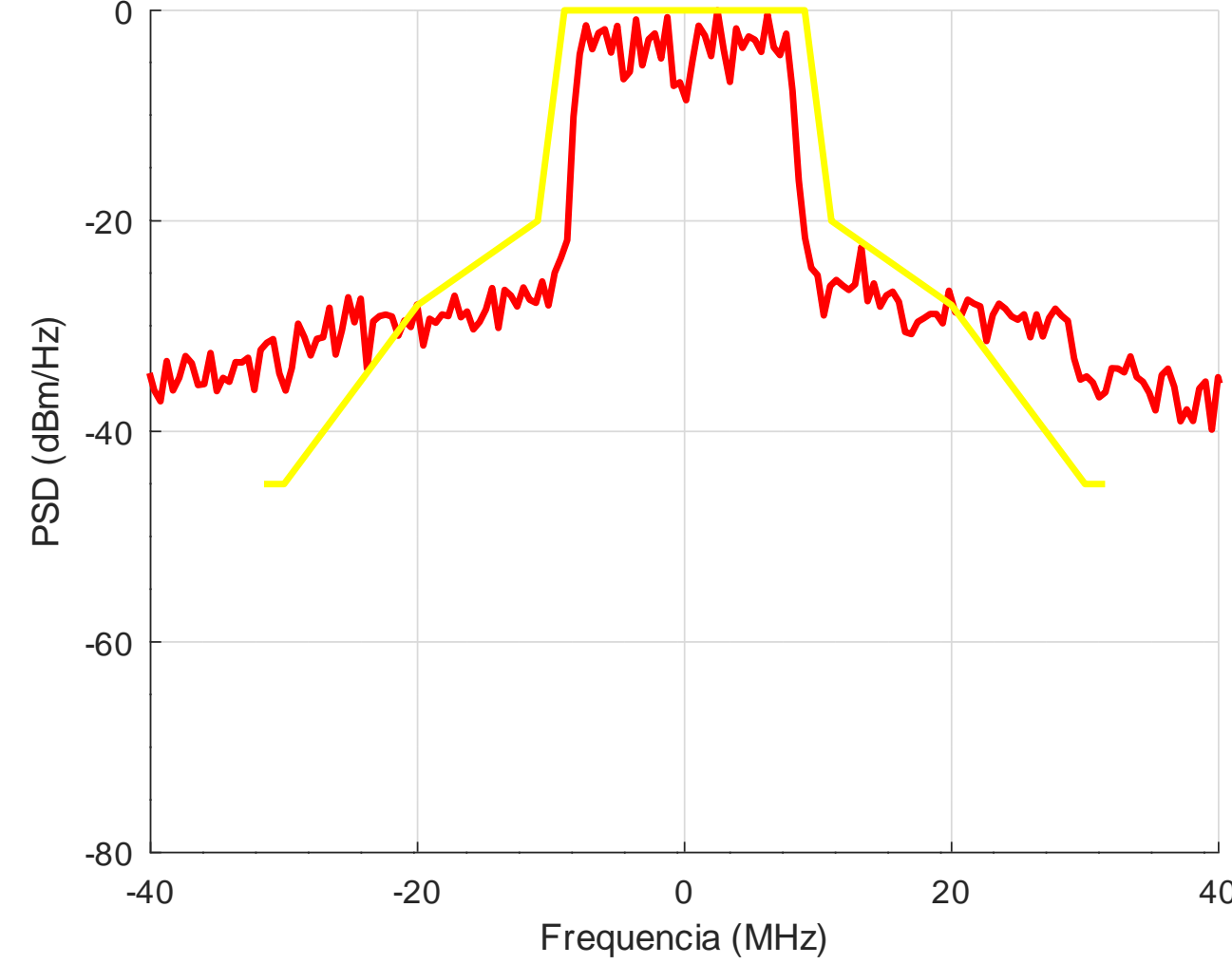
## Saturação

A saturação aumenta a eficiência e controla o PAPR de amplificadores de potência (PA), limitando a amplitude do sinal e preservando a fase. Em banda dupla, dois canais são transmitidos simultaneamente, e cortar o excesso direto pode gerar intermodulação, sendo  $z(n) = |x(n)| - L$ :

$$x_{ic}(n) = \begin{cases} x_i(n), & \text{se } |x(n)| \leq L \\ \left(\frac{|x_i(n)| - z(n)}{2}\right) \exp(j\angle x_i(n)), & \text{se } |x(n)| > L \end{cases} \quad (1)$$

A técnica de repartição proporcional de soma redistribui o excesso entre os canais, mantendo a integridade e as características espectrais. Esse controle refinado permite aumentar a potência média do sinal sem degradar a qualidade. O DPD em banda dupla otimiza eficiência e linearidade para sistemas de alta taxa de transmissão. Porém a realização da saturação na envoltória acaba por induzir um espalhamento espectral, ultrapassando as normas estabelecidas, conforme é possível observar na figura 3:

**Figura 3:** Espalhamento espectral causado pela saturação da envoltória equivalente.



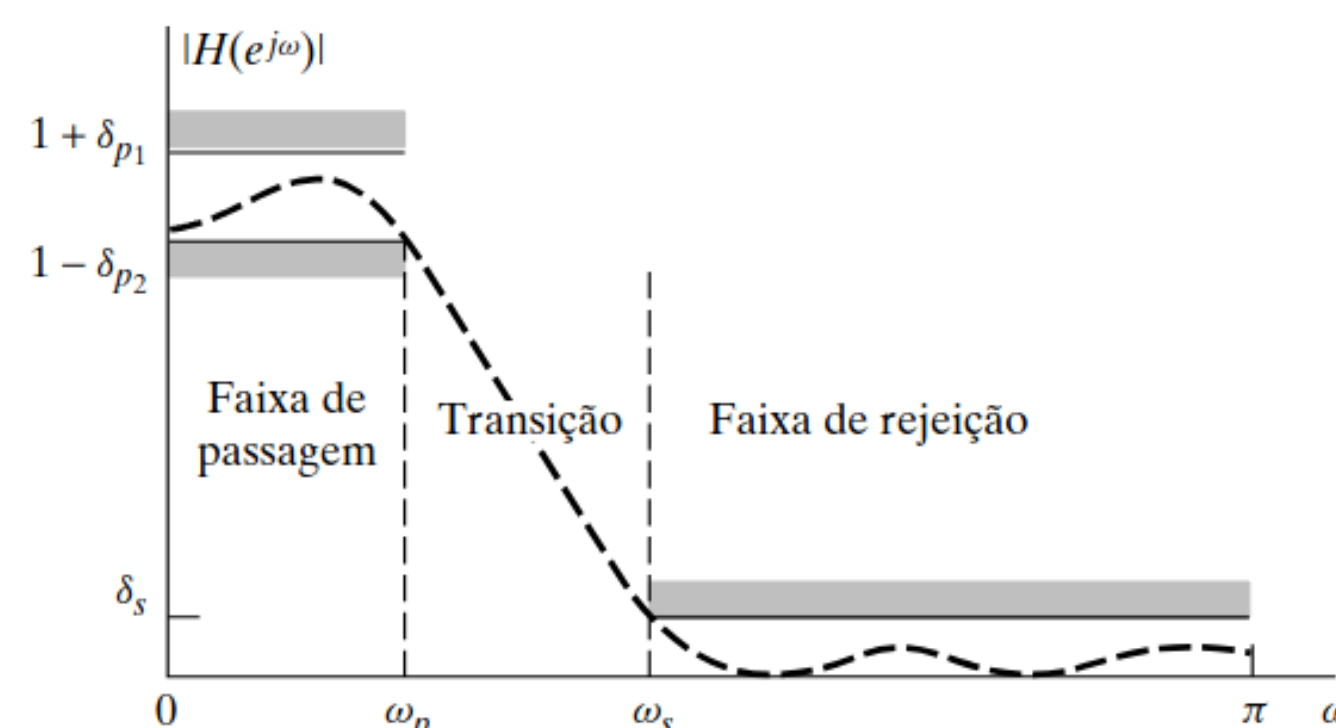
FONTE: AUTOR

## Filtros FIR

Filtros FIR são filtros digitais com resposta finita, projetados ao aplicar uma janela a um filtro ideal para torná-lo prático. A ordem do filtro ( $M$ ) dita seu desempenho e custo: ordens maiores permitem uma separação de frequência mais nítida, mas aumentam a complexidade computacional. O projeto busca um balanço entre a precisão e os recursos disponíveis. Sua principal vantagem é a capacidade de manter uma fase perfeitamente linear, o que é crucial para preservar a forma de onda do sinal sem introduzir distorções de atraso.

Na figura 4, é exemplificado um filtro passa-baixa, o mesmo tipo utilizado para a aplicação do janelamento.

**Figura 4:** Exemplificação de um filtro passa baixa.



FONTE: (Oppenheim; Schafer, 2013)

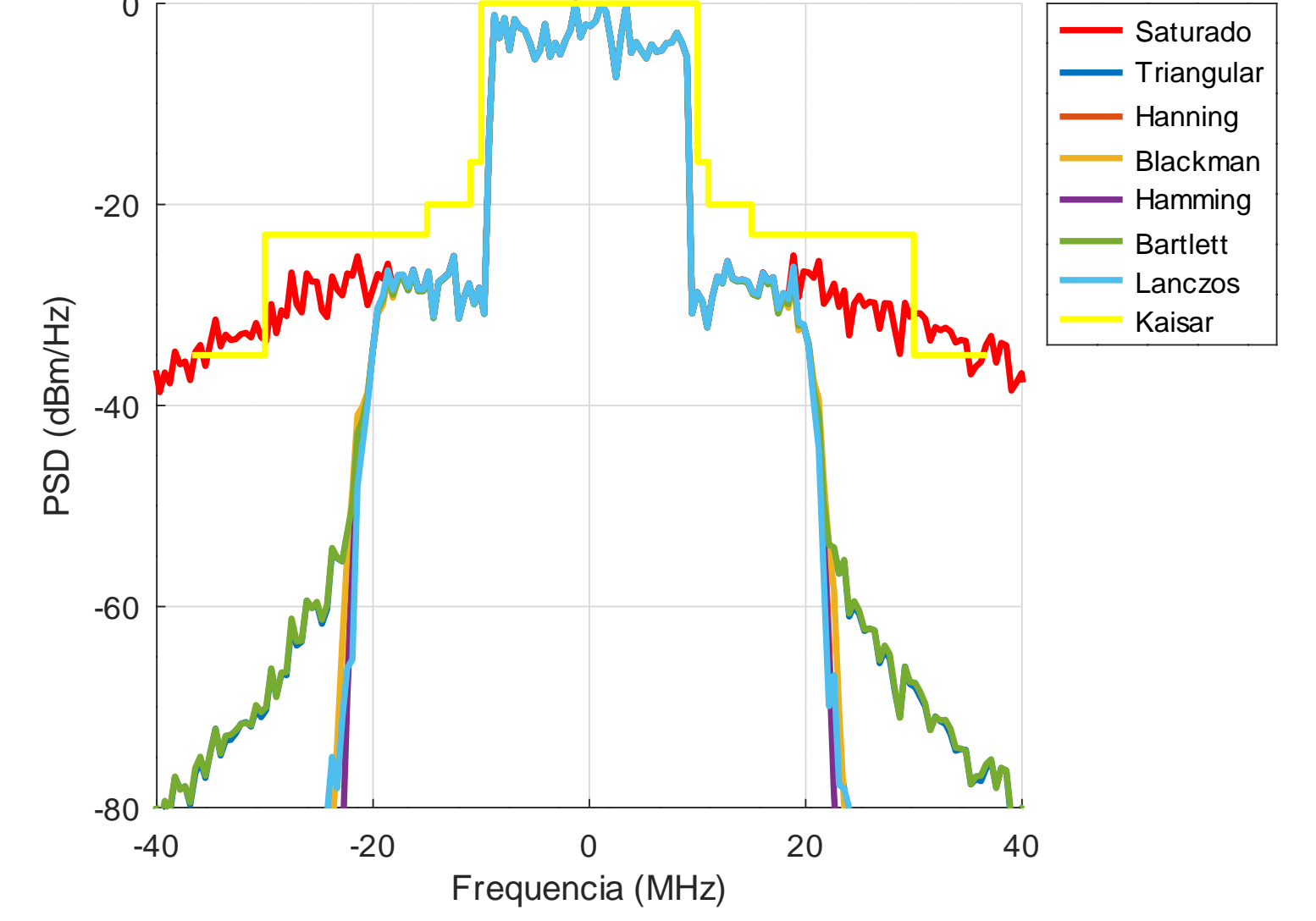
## Resultados e Discussão

Este estudo aplicou um filtro digital em sinais Wi-Fi (2.4 GHz) e LTE (3.5 GHz) com 20 MHz de banda. Primeiramente, os sinais foram submetidos a um processo de saturação com limiar de 1.25V.

Tabela 1: 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%

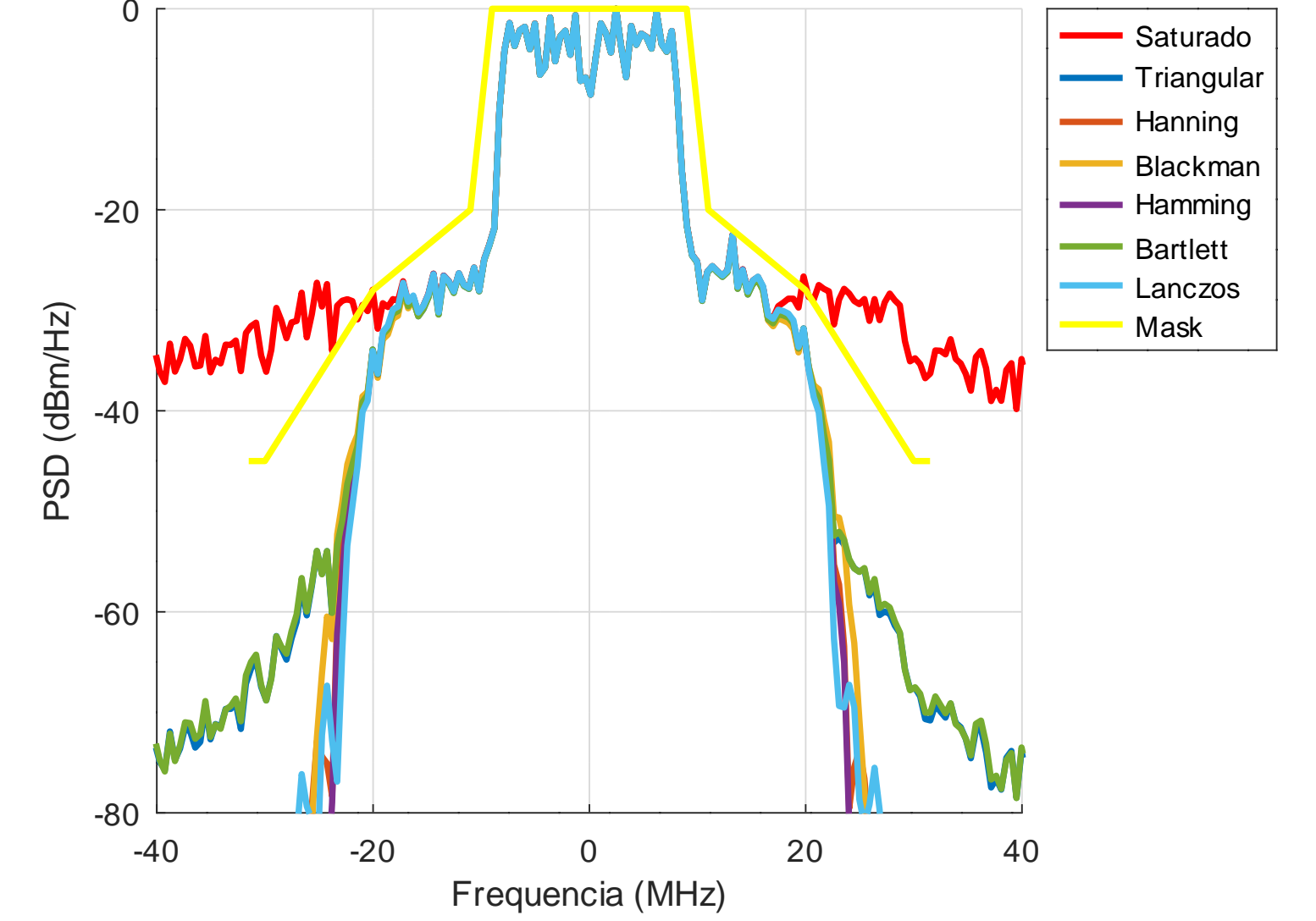
**Figura 5:** Resultado da aplicação do filtro do sinal LTE.



FONTE: AUTOR

A ordem do filtro foi definida arbitrariamente em 50 para o Wi-Fi, figura 6, e 80 para o LTE, figura 5, sendo que a ordem maior resultou em uma transição de frequência mais abrupta no sinal LTE. Diferentes janelas foram comparadas, e a janela de Hamming demonstrou ser a mais eficaz, com uma atenuação mais limitante e próxima da frequência de corte desejada. Devido a esse desempenho, o janelamento Hamming foi o selecionado para as análises tanto de EVM e PAPR, e seus resultados podem ser vistos na tabela 1 e 2, respectivamente.

**Figura 6:** Resultado da aplicação do filtro do sinal Wifi.



FONTE: AUTOR

Tabela 2: 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

## Conclusões

A implementação de um filtro FIR em um sistema DPD+PA, combinada com a saturação do pré-distorcedor, aumenta significativamente a eficiência. Essa técnica permite que o amplificador opere mais próximo de sua região de saturação, elevando a potência média do sinal, conforme a tabela 2. Os resultados mostram uma redução no pico de potência da envoltória do sinal após a filtragem. Crucialmente, essa melhoria é alcançada sem degradação relevante na qualidade do sinal (EVM), conforme a tabela 1, confirmando o efeito positivo do filtro no sistema.

## Referências

- OPPENHEIM, A.; SCHAFFER, R. Processamento em Tempo Discreto de Sinais. [S.l.]: Pearson Universidades, 2013. ISBN 9788581431024
- 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.
- MILIAVACCA, L.; SCHUARTZ, L. Análise dos efeitos da saturação do DPD de banda dupla concorrente. SeMicro-PR, jun. 2024.