

Análise dos efeitos da saturação do DPD de banda dupla concorrente

Luís Otávio Lidoni Miliavacca¹, Luis Schuartz¹

¹GICS, UFPR, Curitiba, Brasil

luismiliavacca@ufpr.br

Resumo — Para garantir o uso de protocolos múltiplos, a alta taxa de transmissão de dados e a eficiência, alguns dos sistemas de transmissão sem fio atuais utilizam transmissões em bandas múltiplas concorrentes. Ainda, para otimizar o rendimento do amplificador de potência (PA) linearizado por um pré-distorcedor digital (DPD), ceifar o sinal é uma opção apresentada na literatura. Entretanto, não foi avaliado se para bandas múltiplas o uso da subamostragem pode causar perda de informação. O presente artigo mostra que mesmo ceifando a envoltória equivalente de um sinal de banda dupla concorrente (2D) sem alterar a frequência de amostragem é possível garantir que os critérios de potência média de canal adjacente (ACPR) e magnitude do vetor de erro (EVM) podem ser mantidos nos limites das normas. Utilizando as abordagens da soma e da divisão, foi possível obter EVM inferior a 8 %, garantindo que o conteúdo útil não foi perdido e que o critério de ACPR é o mais crítico.

I. INTRODUÇÃO

Com a crescente demanda de sistemas de transmissão de dados cada vez mais eficientes e precisos, uma das soluções adotadas é utilizar um sistema de linearização contendo um DPD em cascata com um PA [1-5], que faz o sistema apresentar um comportamento linear e eficiente. Porém, um dos pontos negativos da aplicação do conjunto em questão é o rendimento limitado, que pode ser melhorado aplicando a saturação do DPD [1]. Contudo, a aplicação dessa técnica para cenários de banda dupla concorrente, ou seja, em dispositivos que operam simultaneamente com duas frequências distintas, se faz necessário o uso da frequência de amostragem abaixo do critério de Nyquist [6]. Sendo assim, o presente trabalho visa a demonstrar que aplicar um limiar de saturação ao sinal de envoltória equivalente de banda dupla concorrente com sub amostragem mantém as informações dos sinais originais por meio das análises de gráficos contendo EVM de ambos os canais em função do grau de saturação, e das curvas de densidade espectral de potência (PSD) para diferentes limiares aplicados a envoltória equivalente [7], além de avaliar qual a melhor abordagem para a distribuição da saturação à cada envoltória isolada.

Este trabalho está organizado conforme segue. Na seção II será tratado como expressar a envoltória equivalente para dois sinais de banda concorrente e a sub amostragem; a seção III descreve os métodos de distribuição da saturação para cada banda; a seção IV apresenta os resultados e a seção V sumariza os resultados.

II. ENVOLTÓRIA EQUIVALENTE EM 2D

É possível demonstrar que a envoltória equivalente de um sinal em banda dupla concorrente pode ser escrita como [1]

$$x(n) = x_1(n) e^{-j \Delta\omega \frac{n-1}{f_s}} + x_2(n) e^{j \Delta\omega \frac{n-1}{f_s}}, \quad (1)$$

em que $x_1(n)$ é o sinal do canal 1, $x_2(n)$ o sinal do canal 2, f_s a frequência de amostragem e

$$\Delta\omega = \frac{\omega_2 - \omega_1}{2}, \quad (2)$$

onde ω_1 e ω_2 são as portadoras dos canais transmitidos.

Nesse ponto, é importante notar que a largura de banda do sinal equivalente (1) é muito maior que o valor da frequência de amostragem f_s . Entretanto, o conteúdo útil de cada canal continua sendo o mesmo, logo, mantém a mesma largura de banda dos sinais originais, o que permite a envoltória equivalente ser sub amostrada sem a perda de informação no meio do processo.

III. A APLICAÇÃO DA SATURAÇÃO DA ENVOLTÓRIA EQUIVALENTE PARA CADA PORTADORA

Uma vez que a envoltória equivalente (1) é conhecida, a envoltória saturada $x_c(n)$ é gerada impondo um *hard-clip* em um limiar L conforme [1]

$$x_c(n) = \begin{cases} x(n) & \text{se } |x(n)| \leq L \\ L e^{j\angle x(n)} & \text{se } |x(n)| > L \end{cases} \quad (3)$$

A figura 1 apresenta um exemplo de saturação da envoltória equivalente para $L = 1,25 V$. Contudo é necessário que a saturação seja aplicada isoladamente para $x_1(n)$ e $x_2(n)$.

Seja $z(n)$ o excedente entre $x(n)$ e L , as abordagens da soma e da divisão dividem o excedente para $x_1(n)$ e $x_2(n)$, e estão descritos na sequência.

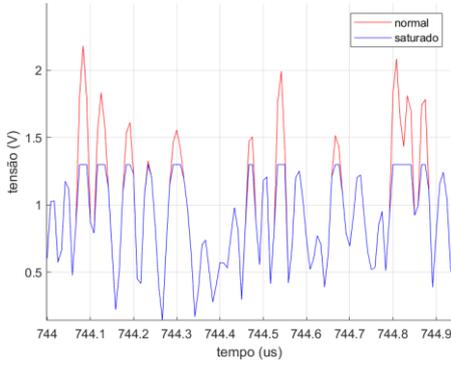


Fig. 1. Sinal equivalente após a saturação.

A. Abordagem da soma

O método da soma consiste em separar o excedente absoluto entre ambos os canais mantendo a fase original. Tomando $z(n) = |x(n)| - L$, o sinal do canal i pode ser representado por [1]

$$x_{ic}(n) = \begin{cases} x_i(n) & \text{se } |x(n)| \leq L \\ \left(|x_i(n)| - \frac{z(n)}{2} \right) e^{j\angle x_i(n)} & \text{se } |x(n)| > L \end{cases} \quad (4)$$

B. Abordagem da divisão

Em oposição ao método da soma, a abordagem da divisão leva em conta o excedente relativo, com $z(n) = |x(n)|/L$, e cada canal recebe [1]

$$x_{ic}(n) = \begin{cases} x_i(n) & \text{se } |x(n)| \leq L \\ \frac{x_i(n)}{z(n)} & \text{se } |x(n)| > L \end{cases} \quad (5)$$

IV. ARQUITETURA DE TESTES

Para a realização dos testes foram geradas duas envoltórias em banda base utilizando o *software* Cadence Virtuoso com os padrões 802.11n e LTE, utilizados para o canal 1 e 2, respectivamente. Ambas com largura de banda de 20 MHz e taxa de amostragem de 120 MHz por meio de simulações de envoltória. O processo de saturação e as abordagens da soma e da divisão são realizados via *software* matemático Matlab, na figura 2 é mostrado um esquemático que demonstra como os testes foram realizados.

Para análise e validação dos resultados são aplicadas as curvas de PSD [8] e EVM [9]. A PSD é avaliada com o Matlab utilizando a transformada rápida de Fourier [10], a razão entre potência média e de pico (PAPR) e a potência média (P_{med}) são obtidas também através do Matlab, que foram calculadas sobre um resistor de 50 Ω . As máscaras das normas e o EVM são obtidos pelo Cadence Virtuoso após a simulação de envoltória.

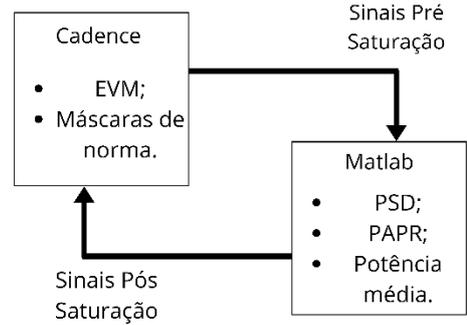


Fig. 2. Esquemático de testes.

O nível de saturação aplicado ao sinal equivalente dado por (1) é quantificado por

$$K [\%] = \frac{|x|_{maximo}}{L} 100, \quad (6)$$

onde $|x|_{maximo}$ é a amplitude máxima que a envoltória equivalente pode atingir. Se K é menor que 100% então não há distorção causada por saturação. Se K é maior que 100%, o sinal equivalente sofre saturação, causando uma distorção nos sinais transmitidos, e consequentemente, o aumento da P_{med} e do rendimento do transmissor. Se da análise de EVM e PSD os critérios de distorção das normas forem mantidos, então a frequência de amostragem abaixo da largura de banda da envoltória equivalente não causou a perda de informações das bandas isoladas.

V. RESULTADOS

A. Resultados obtidos para a abordagem da divisão

Na tabela 1, é mostrado como a PAPR e a P_{med} variam a mediada que K cresce, a figura 3 mostra a evolução da EVM à medida que K aumenta, as figuras 4 e 5 são as PSD's de cada canal e a tabela 2 mostra, para $f_{c1} = 2,4$ GHz, a EVM à medida que f_{c2} varia. Antes de extrair a P_{med} e a PAPR, os sinéis foram normalizados para amplitude unitária.

TABELA 1: PARÂMETROS EM TERMOS DE K PARA DIVISÃO

K	100 %	142 %	203 %	260 %
PAPR (dB) canal 1	8,412	8,416	8,561	8,967
PAPR (dB) canal 2	8,233	8,236	8,124	8,038
PAPR (dB) equivalente	10,326	7,129	4,389	2,866
P_{med} (mW) canal 1	1,4	1,4	1,4	1,3
P_{med} (mW) canal 2	1,5	1,5	1,5	1,6
P_{med} (mW) equivalente	0,93	1,9	3,6	5,2

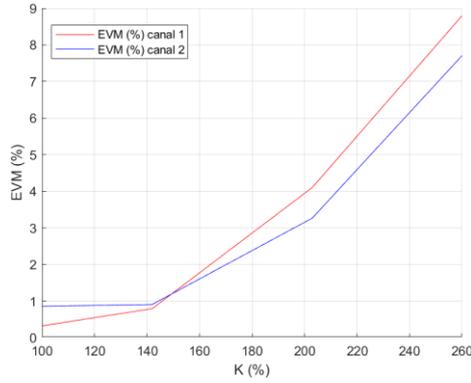


Fig. 3. EVM em função de K utilizando a abordagem da divisão.

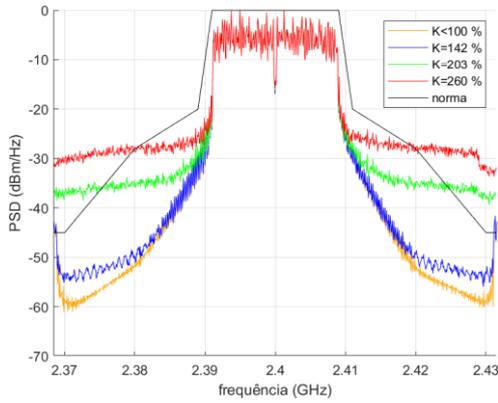


Fig. 4. PSD do canal 1 utilizando a abordagem da divisão.

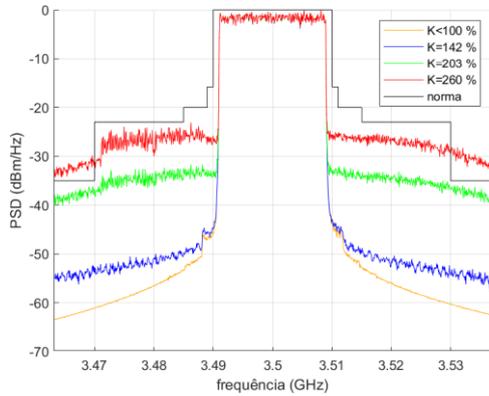


Fig. 5. PSD do canal 2 utilizando a abordagem da divisão.

TABELA 2: COMPARAÇÃO DA EVM PARA DIFERENTES f_{c2} COM $K = 260\%$ PARA A DIVISÃO.

	EVM (%) canal 1	EVM (%) canal 2	Diferença de EVM (%)
$f_{c2} = 2,8 \text{ GHz}$	8,3	6,8	1,5
$f_{c2} = 3,5 \text{ GHz}$	8,8	7,7	1,1
$f_{c2} = 5,0 \text{ GHz}$	8,3	6,9	1,5

Na tabela 1 a PAPR da envoltória equivalente diminui, enquanto a P_{med} aumenta, algo que não necessariamente ocorreu em cada canal. Nas figuras 3, 4 e 5, a PSD nos canais adjacentes aumentam consideravelmente em relação

ao aumento de EVM, atingindo os limites de distorção. Portanto, a PSD acaba sendo o critério de restrição mais crítico. Já a tabela 2 mostra que existe uma diferença de EVM entre os canais 1 e 2, mas que se mantém praticamente constante independente da razão das frequências de portadora utilizadas.

B. Resultados obtidos para a abordagem da soma

Na tabela 3 é mostrado o comportamento da PAPR e da P_{med} à medida que K varia, nas figuras 6, 7 e 8 é tratado a EVM e a PSD de cada canal e na tabela 4 é mostrado como a EVM se comporta à medida que f_{c2} muda. A PAPR e P_{med} foram extraídas após a normalização dos sinais para amplitude unitária.

TABELA 3: PARÂMETROS EM TERMO DE K PARA SOMA

K	100 %	142 %	203 %	260 %
PAPR (dB) canal 1	8,412	8,415	8,538	8,874
PAPR (dB) canal 2	8,233	8,236	8,122	7,998
PAPR (dB) equivalente	10,326	7,129	4,389	2,866
P_{med} (mW) canal 1	1,4	1,4	1,4	1,3
P_{med} (mW) canal 2	1,5	1,5	1,5	1,6
P_{med} (mW) equivalente	0,93	1,9	3,6	5,2

TABELA 4: COMPARAÇÃO DA EVM PARA DIFERENTES f_{c2} COM $K = 260\%$ PARA A SOMA.

	EVM (%) canal 1	EVM (%) canal 2	Diferença de EVM (%)
$f_{c2} = 2,8 \text{ GHz}$	7,1	7,1	0,0
$f_{c2} = 3,5 \text{ GHz}$	7,3	7,9	0,6
$f_{c2} = 5,0 \text{ GHz}$	7,1	7,1	0,0

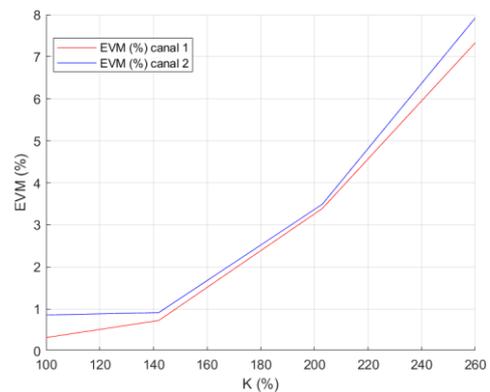


Fig. 6. EVM em função de K utilizando a abordagem da soma.

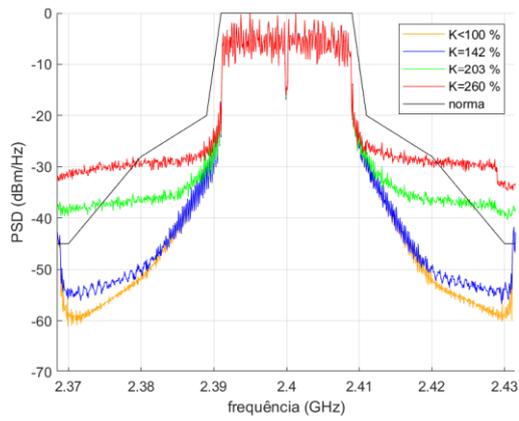


Fig. 7. PSD canal 1 utilizando a abordagem da soma.

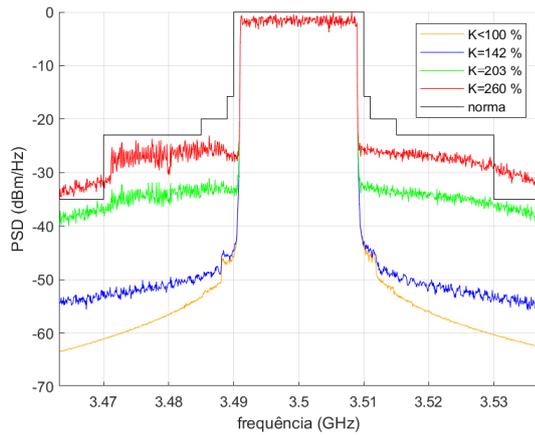


Fig. 8. PSD canal 2 utilizando a abordagem da soma.

Na tabela 3, é possível observar algo similar a abordagem da divisão, havendo uma diminuição na PAPR, e um aumento na P_{med} do sinal equivalente à medida que K aumenta. Já as figuras 6, 7 e 8 mostram que a saturação possui efeito mais crítico na PSD se comparada aos efeitos de EVM da tabela 3, cuja restrição foi atingida mesmo sem atingir o limite de EVM. Novamente, mostrando que a integridade da informação não é perdida. Já da tabela 4, é possível inferir que independente das frequências centrais escolhidas, a diferença de EVM permanece pequena.

C. Comparação entre as abordagens

É possível observar que em ambas as abordagens, a curva de PSD obtida para os mesmos valores de K são muito similares, enquanto há uma diferença razoável entre o comportamento da EVM para os diferentes métodos. A abordagem da soma manteve a diferença de EVM entre o canal 1 e 2 muito próxima, enquanto para a abordagem da divisão, houve uma dispersão maior, e não constante, isso pode ser observado nas figuras 3 e 6, onde é possível observar que, à medida que o grau de saturação aumenta, a abordagem da divisão mantém as curvas mais distantes, enquanto o método da soma mantém as curvas mais próximas. Ainda é possível observar que independentemente da abordagem utilizada, a PAPR e

P_{med} da envoltória equivalente se mantém a mesma, e isso ocorre pois ela independe do método de separação utilizado. Já em relação ao comportamento da EVM com a variação da frequência, as tabelas 2 e 4 mostram que ela se mantém praticamente constante para portadoras próximas e distantes em ambas as abordagens.

VI. CONCLUSÃO

Aplicando o algoritmo de saturação, foi possível observar que ocorreu uma diminuição na PAPR, e um aumento na potência média do sinal equivalente, algo que não necessariamente se refletiu para cada canal após o processo de separação. Já em relação aos tipos de abordagem, o método da soma manteve a EVM de ambos os canais muito próximas à medida que K aumenta, algo que a abordagem da divisão não faz da mesma forma, uma vez que quando K é relativamente alto, há uma tendência da diferença de EVM entre as duas portadoras aumentar. Analisando as curvas PSD's dos sinais, foi possível observar que ambas as abordagens possuem um comportamento similar, atingindo a norma de maneira relativamente rápida quando o nível de saturação começa a ficar maior. Por fim, para os casos analisados, a frequência de amostragem não comprometeu significativamente os valores de EVM.

AGRADECIMENTOS

Essa pesquisa foi financiada em parte pela Fundação Araucária.

REFERÊNCIAS

- [1] Luis Schuartz and Eduardo Lima, Saturation Approach for Dual-Band Transmission with Pre-Distortion for PA Efficiency Increase.
- [2] R. Zepeda-Puebla, Digital Predistortion Linearization For Carrier Aggregation And Wide Bandwidth.
- [3] Taijun Liu, Yan Ye, Siyuan Yin, Hao Chen, Gaoming Xu, Yunlong Lu and Yi Chen, Digital Predistortion Linearization with Deep Neural Networks for 5G Power Amplifiers.
- [4] Linshan Zhao, Shaojun Wan, Kai Kang, Weifeng Feng and Hua Qian, A General Digital Predistortion Linearization Scheme for Hybrid Beamforming System.
- [5] Mehdi Vejdani Amiri, Seyed Aidin Bassam, Mohamed Helaoui and Fadhel M. Ghannouchi, Estimation of crossover DPD using orthogonal polynomials in fixed point arithmetic.
- [6] Vicente Soares Neto, Sistemas de Comunicação - Serviços, Modulação e Meios de Transmissão.
- [7] Taewoo Lee and Hideki Ochiai, Characterization of power spectral density for nonlinearly amplified OFDM signals based on cross-correlation coefficient.
- [8] Simon Haykin, Sistemas de comunicação.
- [9] Mckinley, M. D, Evm calculation for broadband modulated signals.
- [10] Charles K. Alexander and Matthew N. O. Sadiku, Fundamentos de circuitos elétricos.