

SIMULAÇÃO DA EFICIÊNCIA DO AMPLIFICADOR DE POTÊNCIA DOHERTY COM O SINAL ISDB-TB

Carlos Felipe Celestino Leonel (IC) e Cristiano Akamine (Orientador)

Apoio: PIBIC Mackpesquisa

RESUMO

Este artigo apresenta um estudo da eficiência do Amplificador de Potência Doherty (APD) em operação com o sinal de televisão digital (TVD) Integrated Services Digital Broadcasting - Terrestrial (ISDB-TB). O modulador/demodulador ISDB-TB foi implementado no software GNU Radio Companion (GRC) usado em rádios definidos por software (RDS). O GRC permite a transmissão e recepção em tempo real de vários sistemas de comunicação. O sinal de banda passante gerado pelo GRC foi processado em Matlab e convertido como fonte de sinal para o Advanced Design System (ADS). ADS é um software de simulação de circuitos eletrônicos com os principais componentes eletrônicos ativos e passivos disponíveis no mercado. O APD foi projetado com o transistor MOSFET CGH40010F e testado no ADS usando o ISDB-TB gerado no GRC como fonte de sinal. Diversas medidas de desempenho do APD foram realizadas no ADS, e o sinal amplificado foi convertido e analisado no GRC, mostrando que é possível integrar diferentes ferramentas de simulação. O resultado obtido mostra um ganho de 11dB com eficiência energética de 20% para o MER de 37dB.

Palavras-chave: Doherty. ADS. GRC.

ABSTRACT

This paper presents a study of the efficiency of the Doherty Power Amplifier (DPA) in operation with the Integrated Services Digital Broadcasting - Terrestrial (ISDB-TB) digital television (DTV) signal. The ISDB-TB modulator/demodulator was implemented in the GNU Radio Companion (GRC) software used in software-defined radios (SDR). GRC allows real-time transmission and reception of various communication systems. The passband signal generated by the GRC was processed in Matlab and converted as a signal source for the Advanced Design System (ADS). ADS is an electronic circuit simulation software with the main active and passive electronic components available on the market. The DPA was designed with the CGH40010F MOSFET transistor and tested on the ADS using the ISDB-TB generated on the GRC as the signal source. Several DPA performance measures were performed in ADS, and the amplified signal was converted and analyzed in the GRC, showing that it is possible to integrate different simulation tools. The obtained result shows a gain of 11dB with a power efficiency of 20% for the MER of 37dB.

Keywords: Doherty. ADS. GRC.

1. INTRODUÇÃO

A televisão (TV) por radiodifusão terrestre é o principal meio de comunicação em massa que leva informação, cultura e entretenimento para milhões de pessoas. A radiodifusão terrestre consiste na modulação, amplificação e transmissão por uma antena que irradia ondas eletromagnéticas em uma determinada faixa de frequência. No Brasil esse serviço é classificado como sons e imagens, é aberto, gratuito e as transmissões tiveram início na década 50 com a tecnologia analógica em preto e branco (PB). Nos anos 70 o Brasil desenvolveu uma tecnologia retrocompatível com a TV PB chamado de *Phase Alternate Lines-M* (PAL-M). Nos anos 2000 o Sistema Brasileiro de Televisão Digital (SBTVD) foi criado com a tecnologia nipo-brasileira baseada no sistema *Integrated Services Digital Broadcasting – Terrestrial* (ISDB-TB) e tecnologias desenvolvidas pela academia brasileira. Em 2007 o SBTVD entrou em operação comercial na cidade de São Paulo e em setembro de 2014, houve um leilão da faixa de 700 MHz. Na época, a Agência Nacional de Telecomunicações (Anatel) dividiu a frequência em quatro lotes de alcance nacional para a operação do *Long Term Evolution* (LTE) /Quarta Geração (4G). Além disso, a faixa destinada para a TV em *Ultra High Frequency* (UHF) foi reduzida para 473–689 MHz. Em 2015, a empresa Seja Digital foi criada pela Anatel para operacionalizar a migração do sinal da TV analógica para o sinal digital nos canais abertos de televisão no Brasil com recursos do leilão da faixa de 700 MHz para operação da tecnologia LTE/4G de telefonia móvel.

De acordo com a Seja Digital, atualmente 128 milhões de brasileiros assistem TV digital aberta e gratuita, com melhor imagem, melhor qualidade de som, mobilidade, portabilidade, interatividade e audiodescrição. Essa mudança, do sistema analógico para o digital, veio com o intuito de melhorar a qualidade do sinal de áudio e vídeo para os telespectadores. A transmissão desses sinais era degradada no sistema analógico por causa do multipercurso, ruído impulsivo e outros sinais interferentes (Seja Digital, 2020).

Para o serviço de radiodifusão de sons e imagens, as faixas foram divididas em *Very High Frequency* (VHF), de 174–216 MHz, e UHF, de 473–698 MHz.

Em 2007, os transmissores de TV digital começaram a ser instalados, entretanto possuíam baixa eficiência energética. Após muitos estudos, a eficiência energética melhorou devido ao uso de diferentes classes de polarização. A mais usada entre elas é a classe AB, por conta de sua eficiência, que varia entre 25% e 50% (COLANTONIO *et al.*, 2010).

O método de modulação utilizado no SBTVD é o *Orthogonal Frequency Division Multiplexing* (OFDM). O que caracteriza esse sinal é o resultado da soma de várias portadoras ortogonais moduladas de forma independente. De acordo com Pereira (2017), algumas

portadoras podem se interferir, resultando no aumento da Relação de Potência Média de Pico, em inglês *Peak Average Power Ratio* (PAPR), o que consiste em uma distorção no sinal transmitido. É comum observar esse fenômeno em componentes não lineares, como amplificadores de potência, conversores analógicos-digitais e conversores digitais-analógicos. Um valor de referência de PAPR para o sinal OFDM é 12dB (PAREDES, 2014).

Para garantir um bom resultado desses Amplificadores de Potência (AP) numa região linear, foi necessário reduzir o rendimento, o que resultou na diminuição da potência de cada AP e, conseqüentemente, no aumento do número de APs e na dissipação de calor que degrada o sinal. Colantonio *et al.* (2010) e Yahyavi (2014), em seus estudos, evidenciaram ser possível aumentar o rendimento e sua eficiência energética para que o funcionamento seja mais efetivo. É fato que, para resolver esse problema, uma nova tecnologia como a “Doherty” é capaz de satisfazer as necessidades para esse estudo.

William H. Doherty foi o precursor do Amplificador de Potência Doherty (APD). Em 1929, em parceria com a empresa *Bell Telephone Laboratories*, desenvolveu um transmissor de rádio de alta potência. Em 1936, inventou um AP com alta eficiência energética, que ficou conhecido como Doherty, o primeiro a utilizar um transmissor de 500 kW de potência, fabricado pela *Western Electric Company*.

A sua diferença em relação aos outros APs do mercado é que ele consegue operar com potência mais baixa do que o nível de saturação, numa região linear. Assim, com essa característica de seu funcionamento linear e com PAPR, está sendo usado em sistemas wireless como o LTE, 4G, *Worldwide Interoperability for Microwave Access* (WiMAX), *Wireless Fidelity* (WiFi), comunicação por satélite, TV digital e 5G, atingindo uma alta eficiência, maior linearidade e potência de saída. Muitos sistemas de comunicação necessitam de amplificadores lineares para realizar a transmissão com a modulação por amplitude em quadratura, em inglês *Quadrature Amplitude Modulation* (QAM) e OFDM. O Doherty é uma boa escolha para uma alta eficiência de energia adicionada, em inglês *Power-Added Efficiency* (PAE), que é um levantamento para classificar a eficiência de AP que leva em consideração o efeito do seu ganho.

Este artigo tem como objetivo geral analisar o comportamento do APD no ISDB-TB e objetivos específicos: desenvolvimento da modulação/demodulação OFDM compatível com o ISDB-TB; projeto do amplificador de potência Doherty no Advanced Design System (ADS) (ADS, 2020); e integração do GNU Radio Companion (GRC) (GRC, 2020) e ADS usando o Matlab (Matlab, 2020). Este artigo está dividido em seis seções. Na Seção 2, é apresentado o referencial teórico, com a revisão da literatura que foi utilizada para abranger conceitos e estudos sobre o funcionamento do APD, Classes dos APs e métodos para

melhorar a eficiência de um AP. A Seção 3 tem a finalidade de apresentar detalhadamente a metodologia utilizada para a elaboração da pesquisa que resultou no presente artigo. Na Seção 4, é apresentado os resultados e a discussão dos resultados obtidos. E, na Seção 5, são expostas as considerações finais. Por fim, na Seção 6 as referências que embasaram o estudo.

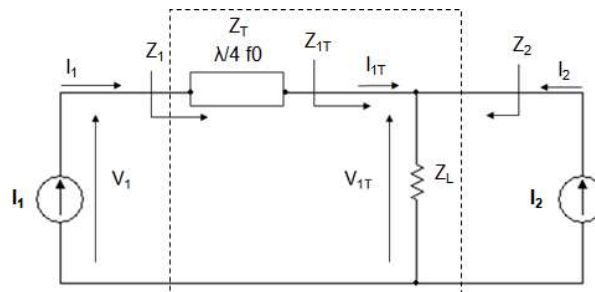
2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1. Princípio de operação do Doherty

O Amplificador Doherty, como já introduzido, se tornou uma alternativa para melhorar a eficiência de um sinal a ser transmitido. A característica principal de seu projeto é a obtenção de uma combinação de dois amplificadores, seus dispositivos ativos. Um deles é denominado Principal ou Portador, e o segundo dispositivo ativo é chamado Auxiliar ou Pico. Os dois dispositivos ativos apresentam polarizações distintas. Normalmente, o amplificador Principal opera na Classe AB, e o amplificador Auxiliar, em Classe C. Essa diferença entre a polarização consiste em que a corrente dos amplificadores depende de um nível considerável de entrada.

Há diferentes formas de analisar o circuito do Doherty. Considera-se que o funcionamento é representado como duas fontes de corrente. Segundo Soler *et al.* (2015), o APD inicia quando o AP Principal começa a funcionar, procedendo como uma fonte de corrente, com carga de impedância duas vezes a sua carga ideal. Nessa condição, o amplificador atinge uma média de sua potência máxima de saída, e resulta também no seu valor máximo de eficiência. Após esse processo, ocorre o que é conhecido como ponto de ruptura. Com isso, o AP Auxiliar é ligado. Na Figura 1, é possível analisar a funcionalidade das duas fontes de corrente (I_1 e I_2).

Figura 1: Representação da saída da rede para o amplificador Doherty.



Fonte: GUSTAFSSON, 2012, p. 4. Adaptado.

A técnica de funcionamento do APD é baseada nas cargas de impedância diferente entre os amplificadores, referida como modulação de carga, de acordo com o nível de potência

de entrada. Como proposto por Kim *et al.* (2006), em seu artigo a carga de impedância dos dois amplificadores é dada como:

$$Z_1 = \frac{\frac{Z_T^2}{Z_L^2}}{\frac{Z_T^2}{Z_L^2} + 1 + \frac{I_2}{I_1}}, \quad \begin{matrix} 0 < v_{in} < V_{in,max}/2 \\ V_{in,max}/2 < v_{in} < V_{in,max} \end{matrix} \quad (1)$$

$$Z_2 = \begin{cases} \infty, & 0 < v_{in} < V_{in,max}/2 \\ Z_L (1 + \frac{I_1}{I_2}), & V_{in,max}/2 < v_{in} < V_{in,max} \end{cases} \quad (2)$$

Essa analogia, é demonstrada na Figura 1 e nas Equações 1 e 2, onde Z_L é a impedância de carga do amplificador; I_1 e I_2 representam as correntes fundamentais dos amplificadores Principal e Auxiliar, respectivamente; Z_1 e Z_2 são as impedâncias de carga de saída dos amplificadores Principal e Auxiliar, respectivamente.

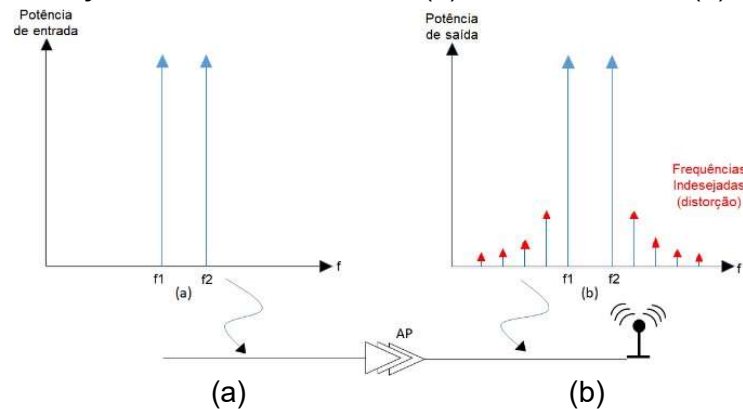
Conforme Kim *et al* (2006), na região de baixa potência da tensão máxima de entrada ($0 \sim V_{in,max}/2$), o AP Auxiliar permanece no estado de corte, e a impedância de carga do AP Principal é duas vezes maior do que a do amplificador convencional. Assim, o AP Principal atinge o estado de saturação na tensão $V_{in,max}/2$, uma vez que atingiu o máximo da tensão de oscilação, chamado de V_{CC} .

Para a região de alta potência ($V_{in,max}/2 \sim V_{in,max}$), em que o AP Auxiliar está na região de condução, o nível da sua corrente desempenha um papel na determinação da modulação de carga do Doherty. Assumindo que a largura de sinal para o Auxiliar é duas vezes maior que o Principal, as correntes de oscilação e tensão do AP Auxiliar aumentam em proporção ao nível de voltagem na entrada, e a voltagem oscilatória atinge a oscilação da voltagem máxima de V_{CC} na tensão máxima de entrada.

Segundo Angulo (2018), em relação aos APs de pequeno sinal, seu nível de potência de entrada é suficientemente baixo para considerar o transistor como componente linear. Para esse caso, os parâmetros em S estão bem definidos e não dependem da potência do sinal de entrada e da impedância de carga. Isso simplifica o *design* de um amplificador de potência em um certo ganho e baixo nível de ruído. Para níveis de potência mais altos, o comportamento não é mais linear, e, neste caso, as impedâncias de entrada e saída são vistas pelo amplificador variando com a potência que o transistor recebe.

Esse parâmetro é observado por Angulo (2018) que corresponde ao *Back-off*. Quando inseridos na entrada de um amplificador sinais múltiplos, ocorrem intermodulações indesejadas, resultando em interferências. Após o amplificador ficar na região linear da operação, os produtos de intermodulação são gerados em vários múltiplos de frequência dos sinais de entrada que não interferem nos sinais principais. À medida que o amplificador vai se aproximando do ponto de saturação, entra na região “não linear”, onde a interferência aumenta a ponto de prejudicar o sinal principal. Isso diminui a qualidade do sinal de saída. Assim, para que o amplificador opere no linear, é preciso que o sinal de potência esteja abaixo do nível de saturação. A Figura 2a mostra a representação da potência de entrada de um certo sinal. Após a amplificação do sinal de entrada, apresenta frequências indesejáveis na saída do AP, como visto na Figura 2b. Essa frequência indesejável é causada por conta do *Back-off*, em que ocorrem intermodulações indesejáveis.

Figura 2: Representação da Potência *Back-off*. (a) sinal de entrada, (b) sinal amplificado.

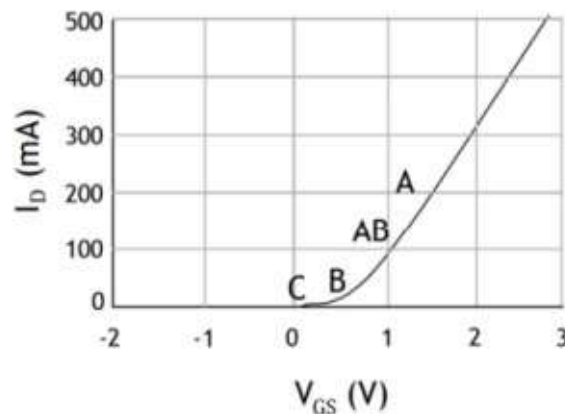


Fonte: EverythingRF, 2020. Adaptado.

2.2. Classes dos amplificadores

Pode-se determinar e demonstrar tipos diferentes de amplificadores através do “ângulo de condução”, o que tem efeitos práticos para o tempo em que o transistor está conduzindo. Pela tensão que é aplicada no *gate* (V_{GS}), o transistor está polarizado em um ponto ou outro, como visto na Figura 3, e é isso que determina a direção de quanto tempo está conduzindo ($I_D > 0$).

O rendimento de um AP depende da classe de operação dos transistores. A classificação se dá de acordo com o ciclo do sinal senoidal de entrada em que há corrente elétrica. Segundo Yahyavi (2014), a aproximação do nível de eficiência dos APs está relacionada com suas classes de operação (com exemplo da Classe A, AB, C etc.). Elas são classificadas de acordo com seu ângulo de condutividade, indicando o nível do sinal de condução para a entrada e saída dos APs. Portanto, a relação direta de ambos tem resultado na eficiência de potência e na linearidade dos APs.

Figura 3: Corrente de dreno I_D em relação a tensão de *gate* V_{GS} .

Fonte: ANGULO, 2018, p. 12.

De acordo com a Tabela 1, é possível analisar as diferentes classes de operação de um AP com descrição do modo de operação de linearidade e eficiência.

Tabela 1: Identificação das classes e suas eficiências.

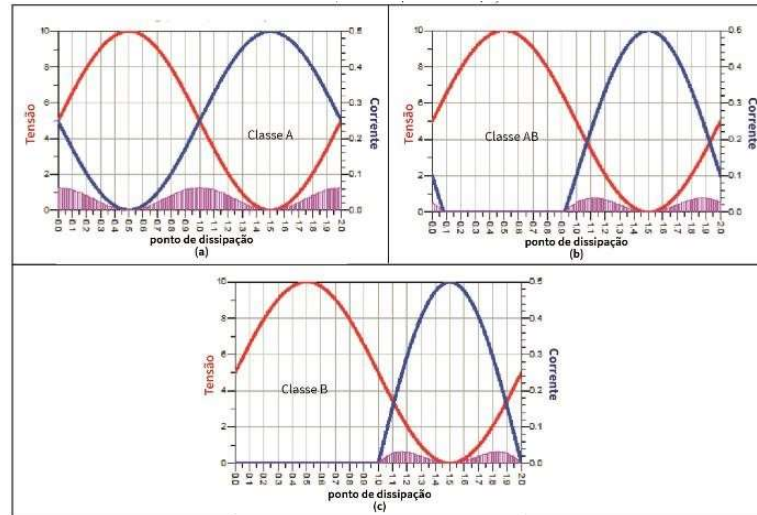
Classe de operação	Modo de operação	Eficiência máxima (teórico) (%)	Linearidade
Classe-A	Fonte de corrente	50	Bom
Classe-AB	Fonte de corrente	Melhor do que a Classe-A e pior do que a Classe-B	Melhor do que a Classe-B e pior do que a Classe-A
Classe-B	Fonte de corrente	78,5	Moderado
Classe-C	Fonte de corrente	100	Baixa linearidade
Classe-D	Interruptor de modo	100	Baixa linearidade
Classe-E	Interruptor de modo	100	Baixa linearidade
Classe-F	Interruptor de modo	100	Baixa linearidade

Fonte: Yahyavi, 2014, p. 6. Traduzido.

O ângulo de condução da Classe A é de 360° . Já na Classe B, é de 180° . Para a Classe AB, está entre 180° e 360° . E, na Classe C, se encontra inferior a 180° . A Classe A é caracterizada com um comportamento mais linear, enquanto a Classe AB é capaz de conseguir o maior PAE permanecendo na zona linear. Nesse ínterim, a Classe C é sempre não linear. A Classe B serve como conceito, pois, pela prática, um transistor não pode começar a conduzir de forma tão abrupta, uma vez que existe uma região intermediária onde é difícil determinar se o amplificador pertence a uma das Classes AB, B ou C. A Figura 4 ilustra a sobreposição entre a tensão e a corrente em função do ponto de dissipação, a Classe

A é representada na Figura 4a, AB na Figura 4b e B na Figura 4c, pode-se afirmar que, quanto menor a sobreposição, maior a eficiência, que é visto para a Figura 4c da Classe B.

Figura 4: Tensão ideal, Corrente e Ponto de Dissipação: (a) Classe A, (b) Classe AB e (c) Classe B.

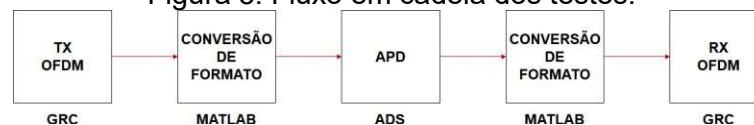


Fonte: Autoria própria.

3. METODOLOGIA

Este trabalho se baseou no tratamento de dados e na manipulação de ferramentas de simulação, como o GRC, Matlab e Advanced Design System (ADS). Na Figura 5, é possível analisar as etapas necessárias para a execução do artigo.

Figura 5: Fluxo em cadeia dos testes.



Fonte: Autoria própria.

O sinal ISDB-TB em banda passante foi gerado no GRC e salvo no formato numérico binário *float*. No Matlab, o arquivo binário *float* é convertido para o formato ASCII *Generic MDIF* (Agilent, 2005) que é compatível com o formato do *software Data File tool* do ADS que gera os *Datasets*. O *VtDataset* é um gerador de forma de onda arbitrária responsável pela geração do sinal ISDB-TB que é amplificado pelo circuito Doherty e o sinal amplificado é salvo no formato ASCII *Generic MDIF* e posteriormente convertido para binário *float*, para a análise Demodulador ISDB-TB implementado no GRC.

O GRC (GNU-RADIO, 2019) é um *software* que opera nos sistemas operacionais Linux, MAC e Windows. Este *software* possui ferramentas para programar um Rádio Definido por Software (RDS) com várias bibliotecas. O RDS, de acordo com Mitola (1995), é um

sistema de radiocomunicação que possui conversor analógico para digital (A/D), digital para analógico (D/A) e processamento digital programável. O GRC, além de várias ferramentas, é capaz de executar em tempo real blocos de processamento digital de sinais, em inglês *Digital Signal Processor* (DSP). Os blocos podem ser programados na linguagem de programação Python e C++.

A interface gráfica do GRC é chamada de fluxograma, em inglês *Flow Graph*. Em sua área de trabalho, é possível conectar blocos de sistemas de comunicação disponíveis em vários módulos.

O Matlab (MATLAB, 2019) é um *software* de simulação em programação matemática apropriado para cálculos numéricos em matrizes, no desenvolvimento de aplicações de natureza técnica. Seu intuito é ter um ambiente que simule um laboratório, com soluções fáceis e precisão. É utilizado para funções matemáticas e cálculos no tratamento de vetores e matrizes, criação de gráficos, processamento de sinais e de imagem, equações diferenciais e ordinárias, além de estatística e finanças.

O ADS (Advanced Design System, 2020) é um *software* para simulação de circuitos eletrônicos desenvolvido pela Keysight EEsof EDA, uma divisão da Keysight Technologies. Ele possui diversas bibliotecas com diversos componentes passivos e ativos e permite o desenvolvimento de circuitos de Radiofrequência (RF), comunicação por satélite, sistemas de radar, entre outros. O ADS permite diversos tipos de simulação: Corrente Contínua, em inglês *Direct Current* (DC), Corrente Alternada, em inglês *Alternating Current* (AC), Balanço Harmônico, em inglês *Harmonic Balance* (HB) e simulação Transiente, em inglês *Transient*.

3.1. ISDB-TB

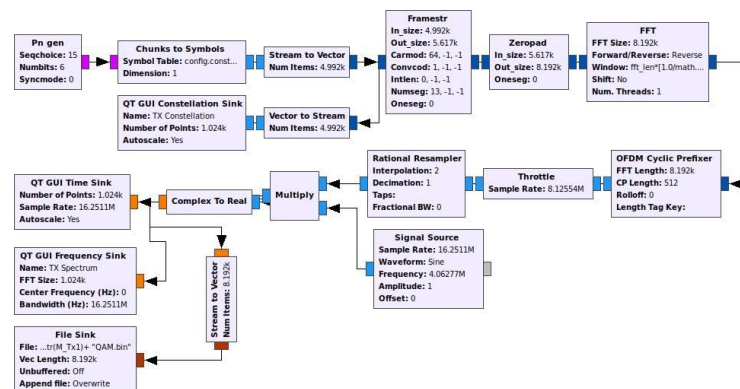
Akamine (2011), Maciel (2014) e Oliveira (2017) estudaram o ISDB-TB e maneiras para realizar a transmissão e recepção usando RDS. A Figura 6 mostra o fluxograma do modulador ISDB-TB implementado no GRC. O bloco “*Pn Gen*” é a fonte de sinal do sistema que gera uma sequência binária pseudoaleatória. Em seguida, o bloco “*Chunks to symbols*” realiza o mapeamento dos bits de entrada para símbolos em fase e quadratura, do inglês *In-Phase/Quadrature* (I/Q). O bloco “*Stream to Vector*” realiza a conversão de amostra para vetor com tamanho de 4992, que é o número de portadoras úteis no ISDB-TB. Em seguida o bloco “*Framestr*” realiza a inserção de pilotos (contínuas, espalhadas e *Transmission Multiplexing Configuration Control* (TMCC) de acordo com os parâmetros de modulação selecionados) resultando em um vetor com tamanho $N=5617$ portadoras. O bloco “*Zeropad*” insere nulos no centro do vetor resultando em um vetor com tamanho de 8192. Em seguida transformada inversa rápida de Fourier, em inglês *Inverse Fast Fourier Transform* (IFFT). A próxima etapa consiste na inserção do intervalo de guarda que resulta no sinal OFDM em banda base. A

Frequência de amostragem (F_s) é controlada no bloco “*Throttle*” que para a largura de banda de $6/14 \times 13 = 5,57142857142857 \text{ MHz}$ utiliza a F_s de $512/63 = 8,12698412698413 \text{ Msps}$.

A etapa seguinte realiza a conversão do sinal OFDM para banda passante e é composta pelo “*Rational Resampler*” que realiza o reamostragem da F_s em um fator 2:1 resultando no valor da $F_s = 1024/63 = 16,2539682539683 \text{ Msps}$ e filtro passa alta que é multiplicado pelo “*Signal Source*” que gera um sinal senoidal na Frequência central (F_c) de $F_s/4 = 4,06349206349206 \text{ MHz}$. Em seguida a fase do sinal OFDM é extraída com o bloco “*Complex To Real*” e então gravada no formato numérico binário *float* com o bloco “*File Sink*”. Os arquivos no formato binário *float* são convertidos através de um script do Matlab para o formato ASCII *Generic MDIF* que é compatível com o ADS.

Os blocos QT (*Constellation*, *Frequency* e *Time Sink*) são utilizados como monitores gráficos do sinal. A Seção 4 apresenta os gráficos gerados por esses blocos.

Figura 6: Fluxograma do modulador ISDB-TB no GRC.

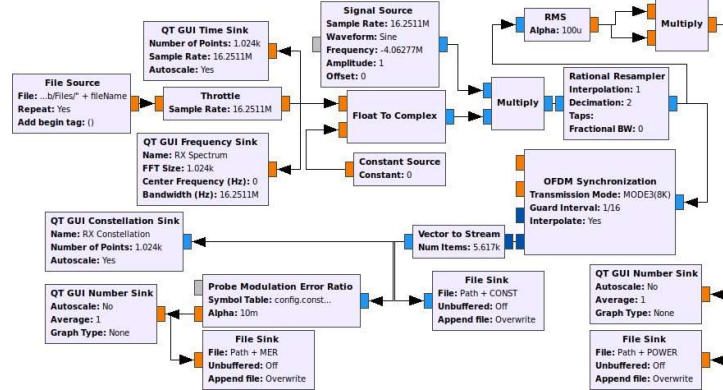


Fonte: Fonte: Autoria própria.

A Figura 7 mostra o fluxograma do Demodulador ISDB-TB usado nos testes. O bloco “*File Source*” realiza a leitura do arquivo processado no ADS (ASCII *Generic MDIF*) que é convertido para binário *float* no Matlab, o bloco “*Throttle*” realiza o ajuste da F_s para $16,2539682539683 \text{ Msps}$, o bloco “*Float To Complex*” realiza a inserção da componente nula em quadratura e converte para o sinal I/Q. Em seguida o sinal é convertido para banda base através da multiplicação com o bloco “*Signal Source*” na F_c de $-4,06349206349206 \text{ MHz}$ e reamostragem com o fator 2:1 para a $F_s = 8,12698412698413 \text{ Msps}$ com filtro passa baixa. Em seguida o bloco “*OFDM Synchronization*” realiza o sincronismo temporal, frequência e amostragem e estimação do canal. O bloco “*Vector To Stream*” realiza a conversão do vetor com $N=5617$ portadoras para amostra e a Taxa de Erro de Modulação, em inglês *Modulation Error Ratio* (MER) é medido no bloco “*Probe Modulation Error Rate*” que executa o cálculo descrito na Equação 3. Os blocos QT (*Constellation*, *Frequency*, *Time Sink* e *Number Sink*) são utilizados como monitores gráficos do sinal e os blocos “*File Sink*” são utilizados para

armazenar os resultados obtidos em um arquivo binário que posteriormente são lidos e processados no Matlab para gerar o gráfico dos resultados.

Figura 7: Fluxograma do Demodulador ISDBT no GRC.



Fonte: Autoria própria.

$$MER(dB) = 10 \log_{10} \frac{\sum_{j=1}^N (I_j^2 + Q_j^2)}{\sum_{j=1}^N (\delta I_j^2 + \delta Q_j^2)} \quad (3)$$

onde, N é o número de portadoras (5617 para o Modo 3) e δI e δQ é o erro (distância entre o símbolo I/Q transmitido e o recebido)

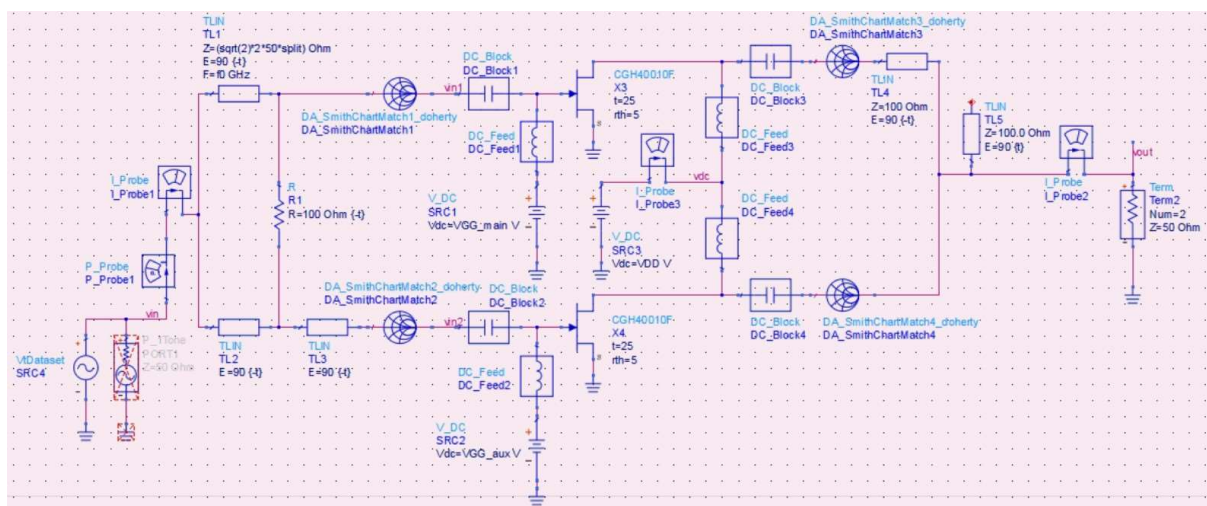
3.2. Amplificador de Potência Doherty

O projeto do amplificador Doherty foi realizado com o transistor CGH40010F fabricado pela empresa Cree, com alta mobilidade de elétrons (HEMT) e nitreto de gálio (GaN), com alimentação de 28V. Ele é capaz de trabalhar em até 6GHz de frequência, com uma eficiência de 65% em estado de saturação, e com um ganho de 16dB em 2GHz.

A Figura 8 ilustra o esquema elétrico do APD desenvolvido. A fonte de sinal para os testes foi o sinal OFDM do ISDB-TB com largura de banda de 5,57142857142857MHz na Fc de 4,06MHz. Esse sinal foi gerado no GRC e convertido para o *Generic* MDIF na qual é reproduzido no *VtDataset* (SRC4). Dois *probes* (P_Probe1 e I_Probe1) foram ligados em série para medir a potência dissipada e corrente. Em seguida o estubo $\lambda/4$ formado pelas linhas de transmissão TL1, TL2, TL3 e resistor R1 foram utilizados para dividir a potência do sinal, esta estrutura é conhecida na literatura como divisor de potência Wilkinson, desenvolvido na década de 60. A Figura 9a e Figura 9b apresentam as estruturas DA_SmithChartMatch 1 e 2 usados no balanceamento harmônico. Estas estruturas servem para o casamento de impedância da linha de transmissão do divisor Wilkinson para os *gates* dos dois estágios formados pelos transistores MOSFET, que formam a base do amplificador classe AB do

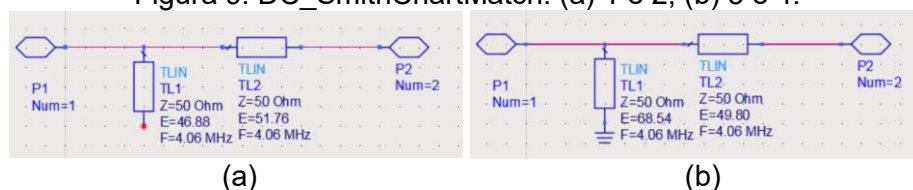
Doherty. Em ambas são utilizadas estubes em curto e em aberto para o casamento de impedância. Os capacitores (DC_block) 1, 2, 3 e 4 e indutores (DC_feed) 1, 2, 3 e 4 atuam como desacoplamento dos transistores X1 e X2. Em uma simulação DC, os indutores (DC_feed) atuam como linhas curto-circuito, e os capacitores (DC_block) como linhas em aberto. A combinação de potência é feita com o balanceamento harmônico DA_SmithChartMatch 3, que tem o papel de promover via estube $\lambda/4$ e DA_SmithChartMatch 4 que pode ser visto na Figura 9b, serve para casar a impedância da linha de transmissão do sinal sai da fonte do transistor MOSFET inferior (Figura 8) que será unido no estube formado por TL_5, esta estrutura serve para o ajuste de fase, é importante notar que é uma estrutura similar a formada pelo TL3 e DA_SmithChartMatch 3, que caracteriza o amplificador Doherty, pois dessa forma é possível obter-se uma elevada linearização do sinal amplificado. Esses dois transistores MOSFET implementam com esses estubes $\lambda/4$, um amplificador principal e um auxiliar, ambos promovem a linearização e amplificação do sinal. O I_Probe2 é ligado em série com a terminação de 50Ω e o sinal amplificado é sinalizado pelo *netlist* vout.

Figura 8: Esquema elétrico do APD.



Fonte: Autoria própria.

Figura 9: DC_SmithChartMatch: (a) 1 e 2; (b) 3 e 4.

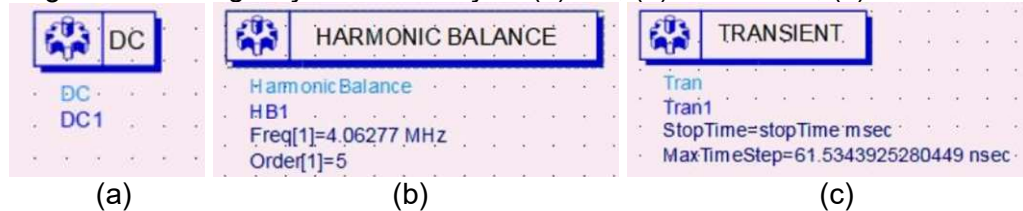


Fonte: Autoria própria.

Como descrito na Seção 3, existem vários tipos de simulação que podem ser realizadas no ADS. Para cada tipo de simulação é preciso realizar a inserção do respectivo

bloco de configuração descrito na Figura 10 no esquema elétrico da Figura 8. Resultados para os três tipos de simulação realizados são apresentados na Seção 4.

Figura 10: Configuração da simulação: (a) DC; (b) Transiente; (c) HB.



Fonte: Autoria própria.

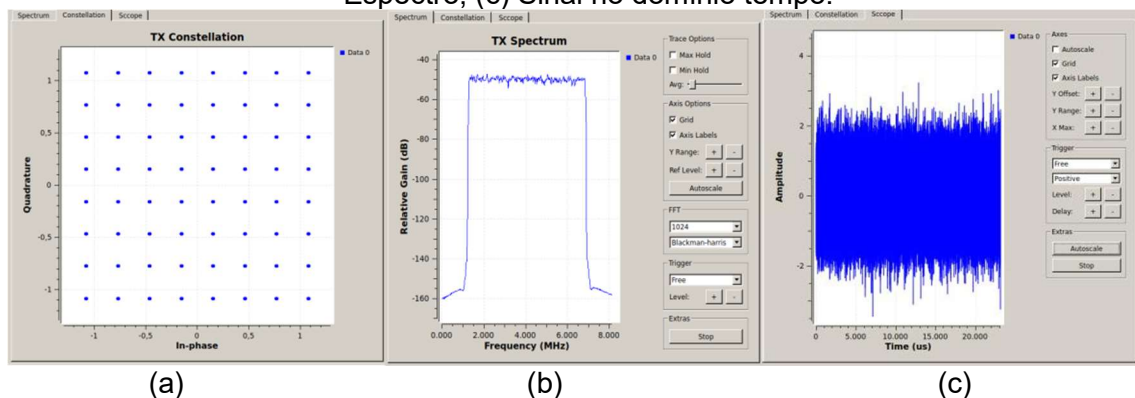
4. RESULTADO E DISCUSSÃO

Como visto na Seção 3.1, o sinal ISDB-TB foi gerado no GRC usando o fluxograma descrito na Figura 6. Os testes foram realizados com 13 segmentos, Modo 3 (8K), Intervalo de Guarda de 1/16, sem codificação de canal e entrelaçadores nas modulações QPSK, 16-QAM e 64-QAM em um quadro ISDB-TB que equivale a 204 símbolos (stopTime = 109,2614519230769ms). A Figura 11a mostra a constelação 64-QAM, a Figura 11b o espectro do sinal e a Figura 11c o sinal no domínio do tempo no GRC.

Em seguida, o sinal binário *float* foi convertido para *Generic MDIF* e exportado para o ADS para ser usado no VtDataset SRC4 descrito no circuito da Figura 8. O sinal gerado pelo SRC4 (vin) pode ser visto na Figura 12 no domínio do tempo e frequência.

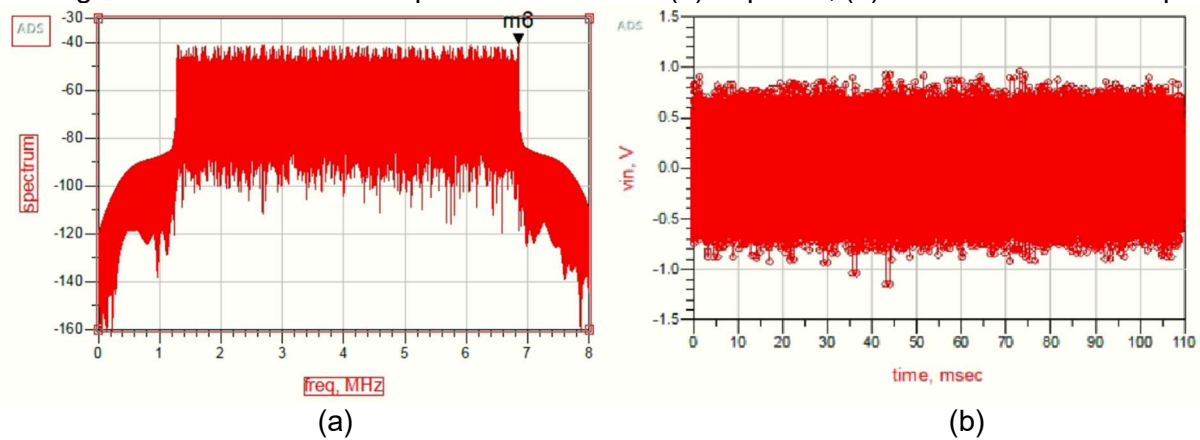
O primeiro teste realizado no APD foi a simulação DC. Para realizar essa simulação foi acrescentado o bloco da Figura 10a no esquema elétrico da Figura 8. A simulação DC permite representar as características de corrente e tensão (I-V) de *gate* do transistor. Por meio desse teste, é obtido o ponto de operação, dependendo do ponto selecionado na referida curva. Assim, foi possível alterar a Classe de operação para AB na qual o transistor funciona. A Figura 13 mostra a caracterização I-V do transistor.

Figura 11: Interface Gráfica do Modulador ISDB-TB: (a) Constelação 64-QAM, (b) Espectro, (c) Sinal no domínio tempo.



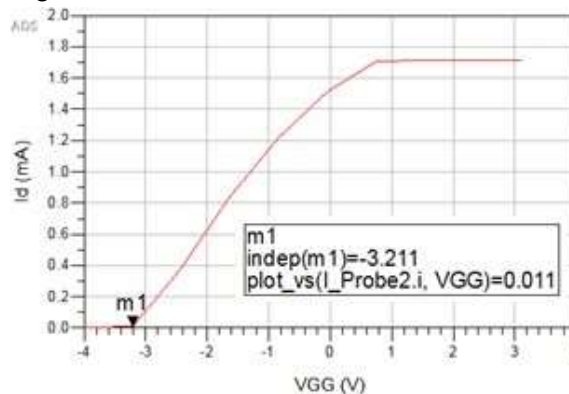
Fonte: Autoria própria.

Figura 12: Sinal ISDB-TB reproduzido no ADS: (a) Espectro; (b) Sinal no domínio tempo.



Fonte: Autoria própria.

Figura 13: Característica de I-V do transistor.



Fonte: Autoria própria.

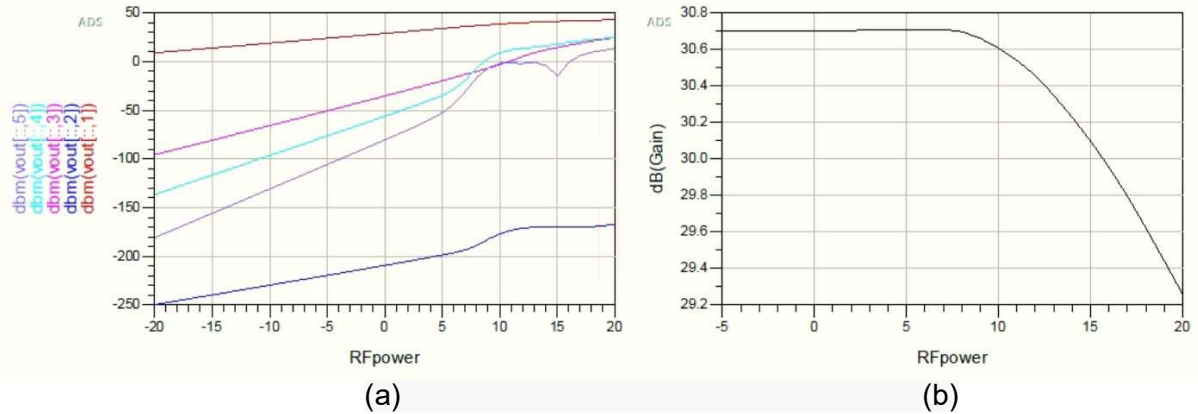
O segundo teste realizado foi a simulação HB. As seguintes modificações no esquema elétrico da Figura 8 foram realizadas: o SRC4 foi desabilitado, o PORT1 foi habilitado e bloco da Figura 10b foi incluído. O HB uma técnica popular para análise de circuitos de micro-ondas, com um alto regime de sinal. Nele, uma rede não linear é descrita por um sistema de equações diferenciais não lineares, com intuito de varrer uma determinada variação de potência de entrada. Os resultados da simulação HB estão apresentados entre a Figura 14 e Figura 16. A Figura 14a mostra os harmônicos de saída até a quinta ordem e a Figura 14b o ganho do sinal.

A Figura 15 mostra o levantamento para classificar a eficiência de energia agregada do amplificador conhecida como PAE. Esse parâmetro é muito importante e resulta na resposta de otimização.

Além da análise de eficiência e de ganho, há também o parâmetro de comportamento linear de um amplificador de potência através do ponto de compressão de 1 dB, que se constitui quando se pode determinar a medida da potência de entrada de um AP em relação

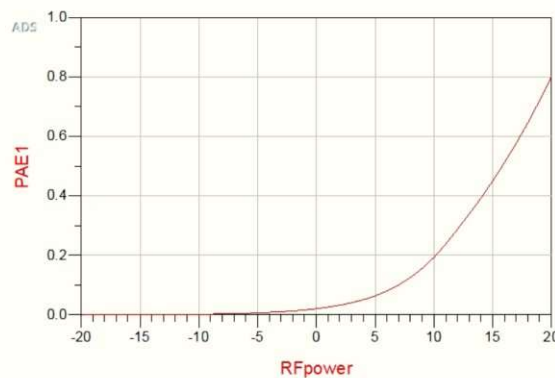
à potência de saída (característica AM-AM). É determinado o ponto de compressão de 1 dB quando se separa da extensão linear dos valores obtidos da potência de entrada, onde sua resposta é linear. Através do circuito visto para simulação, foi possível analisar a eficiência, ponto de 1 dB, na Figura 16.

Figura 14: Gráfico de potência: (a) Harmônicas da tensão de saída, (b) Ganho do sinal.



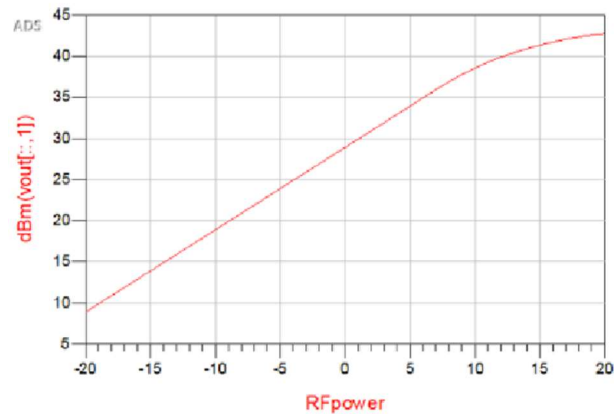
Fonte: Autoria própria.

Figura 15: PAE *Power-Added Efficiency*.



Fonte: Autoria própria.

Figura 16: Ponto de compressão de 1 dB.

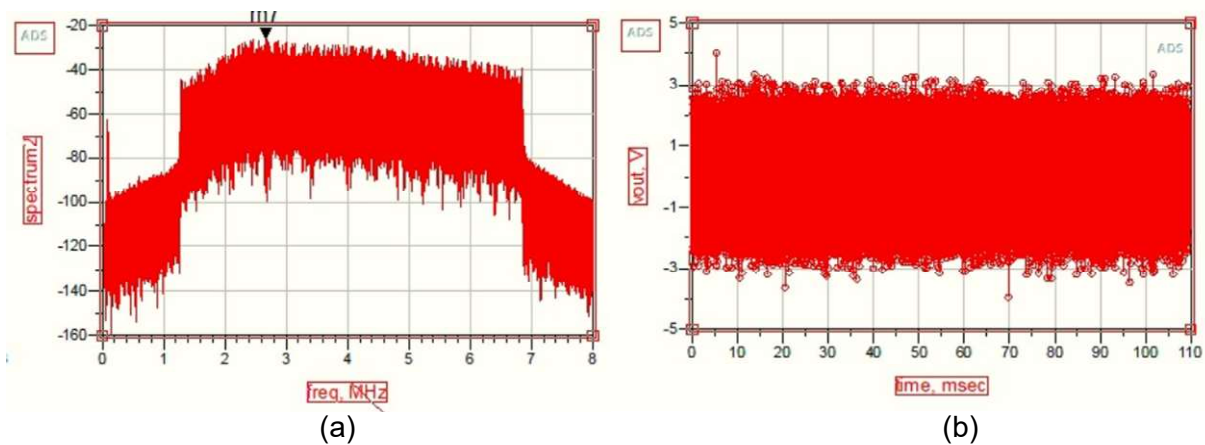


Fonte: Autoria própria.

O terceiro teste foi realizado foi a simulação de transiente. As seguintes modificações no esquema elétrico da Figura 8 foram realizadas: o SRC4 foi habilitado, o PORT1 foi desabilitado e bloco da Figura 10c foi incluído.

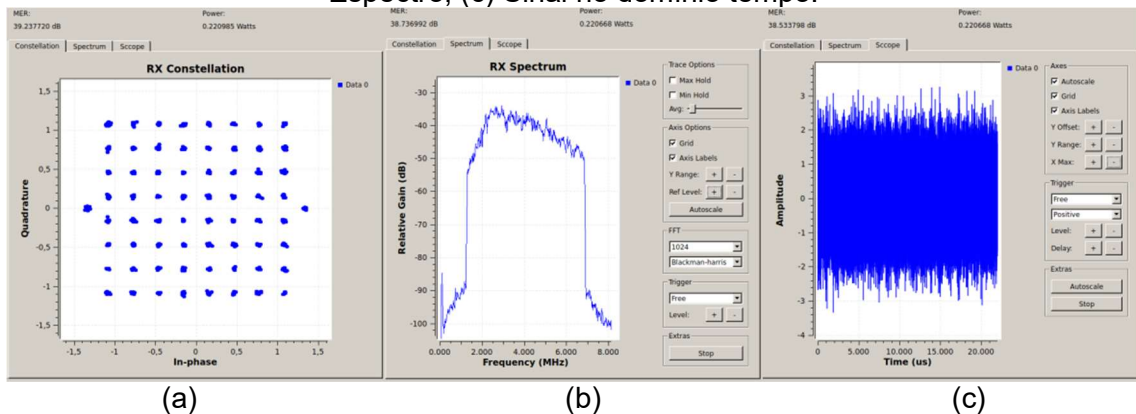
A Figura 17 mostra o sinal no domínio do tempo e frequência gerados no ADS na terminação Term2 (vout) e a Figura 18 a constelação, espectro e sinal no domínio do tempo no GRC após a conversão para binário *float* do sinal vout. Pode-se observar que existe um ganho em torno de 11dB no sinal amplificado, mas a resposta não é plana tanto no ADS e GRC.

Figura 17: Sinal ISDB-TB amplificado no ADS: (a) Espectro; (b) Sinal no domínio tempo..



Fonte: Autoria própria.

Figura 18: Interface Gráfica do Demodulador ISDB-TB: (a) Constelação 64-QAM, (b) Espectro, (c) Sinal no domínio tempo.

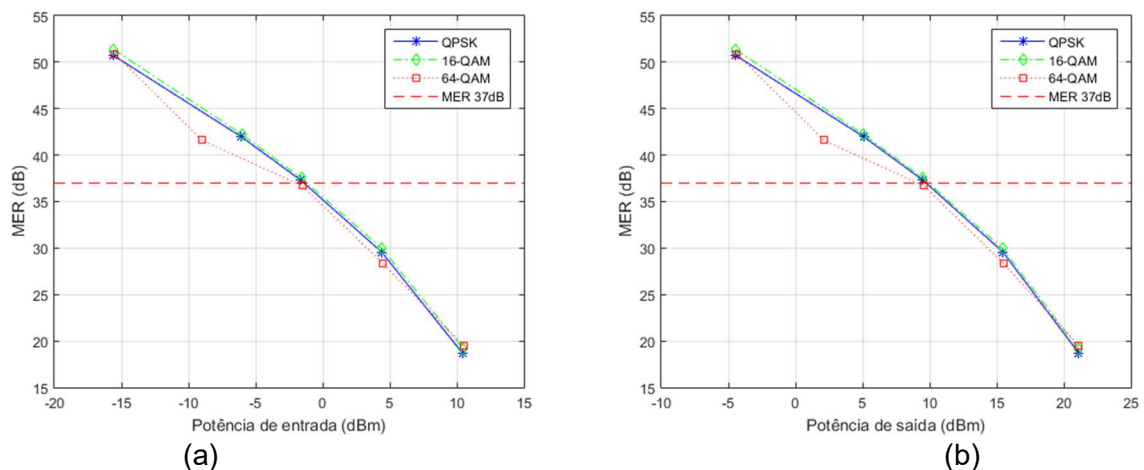


Fonte: Autoria própria.

Com as Etapas 1, 2 e 3 validadas o último teste consiste em variar a potência de entrada no amplificador entre -15 a +10 dBm e analisar a potência de saída e MER. Como visto na Figura 7, o fluxograma do GRC armazena todos os resultados obtidos em arquivos binários. Usando o Matlab é possível realizar a leitura desses arquivos e gerar vários gráficos. A Figura 19a mostra o resultado do MER em função da potência de entrada e a Figura 19b o

MER em função da potência de saída. Pode observar que o ganho do amplificador Doherty está em torno de 11 dB e que à medida que aumenta a potência de entrada, a degradação do MER também aumenta. O MER de 37dB é o valor mínimo permitido para uso nos transmissores de TV digital e é especificado na norma ABNT NBR 15601 (ABNT 15601, 2008). Também pode se observar que o MER é praticamente igual para qualquer ordem de modulação.

Figura 19: Medidas de desempenho do amplificador em função do MER: (a) Potência de entrada, (b) Potência de saída.



Fonte: Autoria própria.

Utilizando como referência a potência de saída de +10dBm obtida na Figura 19b para o MER de 37dB é possível concluir:

- A Figura 14b mostrar o ganho do amplificador em função da potência de saída. Para o valor de +10dBm de potência de saída pode se observar que o amplificador não está operando na região linear e coincide com a degradação do MER;

- Para o valor de +10dBm de potência de saída pode se observar na Figura 15 que a eficiência energética agregada é de 20%;

- A Figura 16 mostra o ponto de compressão de 1dB do amplificador. Para a potência de saída +10dBm pode se observar que o amplificador não está operando na região linear e por isso ocorre degradação no MER.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O estágio de modulação/demodulação OFDM compatível com o SBTVD (ISDB-TB) foi implementado e validado no GRC. Foi possível gerar o sinal OFDM, realizar a conversão de banda-base para banda-passante e vice-versa e realizar as medidas de MER e Potência. Os scripts desenvolvidos no Matlab permitiram a conversão do formato numérico binário *float* para ASCII *Generic MDIF* e vice-versa permitindo o total intercâmbio de dados entre o GRC e ADS.

O amplificador Doherty projetado no ADS teve ganho em torno de 11dB para a F_c de 4,06MHz e ainda ocorreu distorção no sinal amplificado. O ganho ficou abaixo do que apresentado nos testes de HB apresentados na Figura 14 e Figura 16. A discrepância no sinal do ganho e distorção no sinal pode estar relacionada a F_c usada nos testes. O transistor CGH40010F é utilizado na faixa de VHF e UHF, mas devido às limitações computacionais encontradas não foi possível realizar os testes nessas faixas.

Para operação na F_c de 500 MHz, por exemplo a F_s foi ajustada para 2Gsps e o tamanho dos arquivos gerados não conseguiram ser processados pelo computador. O ADS possui o componente RF_Modulator que permite realizar a conversão de um sinal em banda base (I/Q) para RF. Vários testes foram realizados, mas o componente não funcionou corretamente com uma fonte de sinal externa (VtDataset).

Para trabalhos futuros, pretende-se adaptar o uso do componente RF_Modulator no ambiente de testes e implementar o DPA.

Os autores agradecem por toda contribuição recebida pelo Prof. Dr. Edson Tafeli Carneiro dos Santos e Eduardo Fluhmann Filho no desenvolvimento do amplificador e simulações realizadas no ADS.

Os autores também agradecem a Keysight EEs of EDA pela licença de estudante do ADS que permitiu realizar esta pesquisa.

6. REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 15601: Televisão digital terrestre - Sistema de transmissão. Rio de Janeiro, 2008.

ADVANCED DESIGN SYSTEM (ADS). Disponível em <<https://www.keysight.com/br/pt/products/software/pathwave-design-software/pathwave-advanced-design-system.html>>. Acesso em: 30 mar. 2020.

AGILENT Technologies, Using Circuit Simulators, Chapter 4: Working with Data Files, 2005 Disponível em: <<http://literature.cdn.keysight.com/litweb/pdf/ads2005a/cktsim/ck0418.html>> Acesso em: 12 fev. 2021.

ANGULO, Jesús Barrero. *Diseño por simulación de un amplificador de potencia Doherty*. Dep. Teoría de la Señal y Comunicaciones Escuela Técnica Superior de Ingeniería Universidad de Sevilla. Sevilla, 2018.

AKAMINE, Cristiano. Contribuições para Distribuição, Modulação e Demodulação do Sistema de TV Digital ISDB-TB. 2021. 180 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Elétrica e de Computação, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2011.

COLANTONIO, Paolo; GIANNINI, Franco; GIOFRE, Rocco; PIAZZON, Luca. *The AB-C Doherty Power Amplifier - Part I: Theory*. Roma: Intech, 2010, p. 293-305.

EverythingRF. Disponível em: <<https://www.everythingrf.com/community/what-is-power-backoff-in-an-amplifier>>. Acesso em: 9 abr. 2020.

GNU-Radio Companion (GRC). Disponível em: <<https://www.gnuradio.org>>. Acesso em: 15 nov. 2020.

GUSTAFSSON, David. *Theory and Design of Wideband Doherty Power Amplifiers*. Technical report MC2-229, Suécia, 2012, p. iii.

KIM, B.; KIM, J.; KIM, I.; CHA, J. The Doherty power amplifier. *IEEE Microwave Magazine* vol. 7, n. 5, pp. 42-50, Oct. 2006, DOI: 10.1109/MW-M.2006.247914.

MACIEL, Yuri Pontes. Modulador 1-seg para SBTVD usando GNU Radio. 2020. 96 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Presbiteriana Mackenzie, São Paulo, 2014.

MATLAB. Disponível em: <<https://www.mathworks.com/products/matlab.html>>. Acesso em: 30 nov. 2020.

MITOLA, Joe. The Software Radio Architecture. *IEEE Communications Magazine*, v. 33, n. 5, p. 26-38, May 1995.

OLIVEIRA, George Henrique Maranhão Garcia de. Implementação de técnicas robustas de codificação e modulação para o sistema ISDB-TBB LDM. 2020. 52 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Elétrica e Computação, Universidade Presbiteriana Mackenzie, São Paulo, 2017.

PAREDES, Martha Cecilia Paredes. Algoritmos para la reducción de los picos de potencia en los sistemas OFDM. 2014. 182 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Elétrica, Teoría de La Señal y Comunicaciones, Universidad Carlos III de Madrid, Madrid, 2014.

PEREIRA, Esequiel da Veiga. Transmissão de Sinais OFDM com Envolvória Constante em Sistemas Ópticos com Detecção Coerente. 2017. 149 f. Monografia (Especialização) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2017.

SEJA DIGITAL. ESTUDO DE CASO SOBRE A ATUAÇÃO DA SEJA DIGITAL, 2020. Disponível em: <<https://sejadigital.com.br/estudodecaso/>>. Acesso em: 21 fev. 2021.

SOLER, Jonathan Javier Tinjacá et al. Diseño de un amplificador Doherty con etapa de pre-amplificación para aplicaciones WiMAX. 2020. 39 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Colômbia, 2015.

YAHYAVI, Mehran. *On the design of high-efficiency RF Doherty power amplifiers*. 2014 Universitat Politècnica de Catalunya. Departament de Teoria del Senyal i Comunicacions. Barcelona, 2014. Disponível em: <<https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/98116/TMY1de1.pdf>>. Acesso em: 2 abr. 2019.

Contatos: cfleonel@gmail.com aluno e cristiano.akamine@mackenzie.br orientador