

UNIVERSIDADE DO ESTADO DO AMAZONAS  
ESCOLA SUPERIOR DE TECNOLOGIA

EMILY GOMES DE MESQUITA

ELABORAÇÃO DE UMA METODOLOGIA PARA ANÁLISE DE PARÂMETROS DE  
INTEGRIDADE DE SINAIS EM BARRAMENTOS USB 3.0.

MANAUS  
2023

EMILY GOMES DE MESQUITA

ELABORAÇÃO DE UMA METODOLOGIA PARA ANÁLISE DE PARÂMETROS DE  
INTEGRIDADE DE SINAIS EM BARRAMENTOS USB 3.0.

Pesquisa desenvolvida durante a disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso II e apresentada à banca avaliadora do Curso de Engenharia Elétrica da Escola Superior de Tecnologia da Universidade do Estado do Amazonas, como pré-requisito para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

MANAUS  
2023

**Universidade do Estado do Amazonas – UEA**  
**Escola Superior de Tecnologia - EST**

Reitor:

**André Luiz Nunes Zogahib**

Vice-Reitor:

**Kátia do Nascimento Couceiro**

Diretora da Escola Superior de Tecnologia:

**Ingrid Sammyne Gadelha Figueiredo**

Coordenador do Curso de Engenharia Elétrica:

**Israel Gondres Torné**

Banca Avaliadora composta por:

Data da defesa: 04/09/2023.

**Prof. Rubens de Andrade Fernandes, Me. (Orientador)**

**Prof. Jozias Parente de Oliveira, Dr.**

**Prof. Fábio de Souza Cardoso, Dr.**

## **CIP – Catalogação na Publicação**

Mesquita, Emily Gomes de

Elaboração de uma Metodologia para Análise de Parâmetros de Integridade de Sinais em Barramentos USB 3.0./ Emily Gomes de Mesquita; orientado por Rubens de Andrade Fernandes. – Manaus: 2023.

83 p.: il.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica). Universidade do Estado do Amazonas, 2023.

1. Barramentos USB 3.0. 2. Reflectometria no Domínio do Tempo (TDR). 3. Testes de pré-conformidade.

I. Fernandes, Rubens de Andrade.

EMILY GOMES DE MESQUITA

ELABORAÇÃO DE UMA METODOLOGIA PARA ANÁLISE DE PARÂMETROS DE INTEGRIDADE DE SINAIS EM BARRAMENTOS USB 3.0.

Pesquisa desenvolvida durante a disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso II e apresentada à banca avaliadora do Curso de Engenharia Elétrica da Escola Superior de Tecnologia da Universidade do Estado do Amazonas, como pré-requisito para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Nota obtida: 10 ( DEZ )

Aprovada em 04 / 09 / 2023.

Área de concentração: Comunicações Digitais

BANCA EXAMINADORA



Orientador: Rubens de Andrade Fernandes, Me.

  
Avaliador: Jozias Parente de Oliveira, Dr.

  
Avaliador: Fábio de Souza Cardoso, Dr.

Manaus  
2023

## AGRADECIMENTOS

A toda minha família pelo apoio incondicional e pelo incentivo durante toda a minha jornada acadêmica. Seus encorajamentos foram um pilar essencial para que eu pudesse superar os desafios e alcançar este marco importante.

Também sou grata aos meus amigos que se mantiveram presentes em qualquer dos âmbitos da minha vida (acadêmica, profissional ou social) por tornar essa caminhada mais leve e suportável. Em especial, agradeço meu parceiro Yago Oliveira por toda a ajuda, paciência, incentivo e principalmente pelos conhecimentos passados, sua mentoria foi essencial para a finalização dessa pesquisa.

Não posso deixar de mencionar meu orientador e amigo, professor Me. Rubens Fernandes, obrigada pela orientação valiosa, pelo tempo dedicado às discussões construtivas e pelo apoio constante ao longo de todo o processo de desenvolvimento deste trabalho.

Por fim, agradeço a todas as outras pessoas que, de alguma forma, contribuíram para este trabalho, mesmo que não mencionadas nominalmente. Cada gesto de apoio, conselho e encorajamento foi essencial.

*“O agora importa mais do que qualquer outro momento, pois é o que você está fazendo hoje que está determinando em quem você está se tornando.”*

*- Hal Elrod*

## RESUMO

O trabalho apresenta uma pesquisa metodológica para a análise de parâmetros de integridade de sinais em barramentos USB 3.0 através da técnica de reflectometria no domínio do tempo (TDR), visando a viabilidade na análise de pré-conformidade de produtos em fase de desenvolvimento que contenham esse tipo padrão de comunicação. Inicialmente, há uma pesquisa das especificações do USB 3.0 e do cabo USB tipo C para categorizar a placa a ser testada (podendo ser um host, um dispositivo periférico, um hub ou uma interconexão), resultando na delimitação dos equipamentos de conformidade conforme a norma do USB-IF. Posteriormente, uma pesquisa de mercado avalia os custos dos equipamentos, buscando alternativas mais acessíveis, destacando-se o TDR. São realizados ensaios preliminares com o TDR em laboratório, calibrando-o, configurando outros instrumentos como o osciloscópio, e identificando os acessórios necessários para os testes finais. Os testes são realizados a partir da metodologia proposta, registrando cada etapa, desde a caracterização do Dispositivo sob Teste (DUT) até a análise dos resultados obtidos. Os testes abrangem as análises do fixture escolhido, coletas com DUT e dispositivo equivalente, visando comparação. Os principais resultados obtidos são a análise do perfil de impedância e estimativa da banda de frequência que definem o DUT como um dispositivo fora do padrão USB 3.0 e validam a metodologia proposta para testes de pré-conformidade. Finalmente, as conclusões abordam os dados levantados, o desempenho da metodologia proposta e sugestões para aprimorar a precisão dos resultados.

**Palavras-chave:** Barramentos USB 3.0, Reflectometria no Domínio do Tempo (TDR), testes de pré-conformidade.

## ABSTRACT

The work presents methodological research for the analysis of signal integrity parameters in USB 3.0 buses using Time Domain Reflectometry (TDR) technique, aiming at the feasibility of pre-compliance analysis of products in the development phase that contain this standard type of communication. Initially, there is research on the specifications of USB 3.0 and USB Type-C cable to categorize the board to be tested (which can be a host, a peripheral device, a hub, or an interconnection), resulting in the identification of compliance equipment according to the USB-IF standard. Subsequently, market research evaluates the costs of the equipment, seeking more affordable alternatives, with a special emphasis on TDR. Preliminary tests are conducted with the TDR in the laboratory, calibrating it, configuring other instruments such as the oscilloscope, and identifying the necessary accessories for the final tests. The tests are carried out following the proposed methodology, documenting each step, from the characterization of the Device under Test (DUT) to the analysis of the obtained results. The tests encompass the analysis of the chosen fixture, data collection with the DUT and an equivalent device, aiming for comparison. The main results obtained include the analysis of impedance profile and the estimation of the frequency band that defines the DUT as a non-compliant USB 3.0 device, thus validating the proposed pre-compliance testing methodology. Finally, the conclusions address the collected data, the performance of the proposed methodology, and suggestions for improving result accuracy.

**Keywords:** USB 3.0 buses, Time Domain Reflectometry (TDR), pre-compliance tests.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Sinais de banda base.....	19
Figura 2 - Mapeamento de caractere para símbolo (técnica 8b/10b) .....	20
Figura 3 - Requerimentos de integridade para o par diferencial D+/D- do USB tipo C.....	22
Figura 4 - Alvos de design para conjuntos de adaptadores USB tipo C para USB 3.0.....	22
Figura 5 - TDR diferencial da marca Picotest, modelo J2154A.....	24
Figura 6 - Conexão dos terminais do TDR a um cabo.....	24
Figura 7 - Osciloscópio Digital de bancada modelo TBS100C.....	25
Figura 8 - Esquema de conexão do J2154A para operar como VNA.....	26
Figura 9 - Diagrama dos parâmetros S em uma rede de duas portas.....	28
Figura 10 - Método utilizado no trabalho.....	30
Figura 11 - Arquitetura de sistema de barramento duplo USB 3.2.....	33
Figura 12 - Diagrama de funcionamento do DUT.....	34
Figura 13 - Interface do receptáculo USB tipo C.....	36
Figura 14 - Interface do programa <i>IntePar</i> .....	38
Figura 15 - Kit LibreVNA de duas portas.....	39
Figura 16 - Acessórios utilizados nos testes preliminares.....	41
Figura 17 - Sinal dos canais do osciloscópio calibrados.....	42
Figura 18 - Configuração da função matemática para medições de TDR diferencial com o TDR J2154A.....	43
Figura 19 - Medição de impedância da carga de 50 $\Omega$ antes da calibração do TDR.....	44
Figura 20 - Medição de impedância da carga de 50 $\Omega$ depois da calibração do TDR.....	44
Figura 21 - Medição da impedância de duas cargas de 50 $\Omega$ em paralelo.....	45
Figura 22 - Resultado da medição da impedância de duas cargas de 50 $\Omega$ em paralelo.....	45
Figura 23 - Medição dos cabos SMA para SMP.....	46
Figura 24 - Resultado da medição dos cabos SMA para SMP.....	46
Figura 25 - Conexão de um cabo simples de 50 $\Omega$ SMA para SMP a um canal do TDR.....	47
Figura 26 - Perfil de impedância de um cabo simples de 50 $\Omega$ em modo de amostragem.....	48
Figura 27 - Perfil de impedância de um cabo simples de 50 $\Omega$ em modo de média.....	48
Figura 28 - Testes preliminares com o fixture ZEBAX.....	49
Figura 29 - Perfil de impedância do sistema com o fixture ZEBAX.....	50
Figura 30 - Perfil de impedância do fixture ZEBAX.....	50

Figura 31 - Testes preliminares com o fixture WILDER.....	51
Figura 32 - Perfil de impedância do sistema com o fixture WILDER.....	52
Figura 33 - Perfil de impedância do fixture WILDER.....	53
Figura 34 - Diagrama simplificado do setup de testes para análise de viabilidade técnica.....	56
Figura 35 - Acessórios utilizados nos testes finais.....	58
Figura 36 - Setup de testes do perfil de impedância do DUT.....	59
Figura 37 - Impedância do cabo SMA para SMP.....	60
Figura 38 - Impedância do cabo <i>Thunderbolt 3</i> .....	60
Figura 39 - Impedância do DUT.....	61
Figura 40 - Impedância do cabo USB 3.2.....	61
Figura 41 - Setup de testes do perfil de impedância do dispositivo equivalente.....	62
Figura 42 - Impedância do dispositivo equivalente.....	62
Figura 43 - Conectores USB tipo C.....	63
Figura 44 - Setup de testes do <i>rise time</i> do sistema sem o DUT.....	63
Figura 45 - Medição do <i>rise time</i> do sistema sem DUT no padrão 10-90.....	64
Figura 46 - Setup de testes do <i>rise time</i> do sistema com o DUT.....	65
Figura 47 - Medição do <i>rise time</i> do sistema com DUT no padrão 10-90.....	65
Figura 48 - Medição do <i>rise time</i> do sistema sem DUT no padrão 20-80.....	66
Figura 49 - Medição do <i>rise time</i> do sistema com DUT no padrão 20-80.....	66
Figura 50 - Setup de teste para medição do <i>rise time</i> do dispositivo equivalente.....	67
Figura 51 - Medição do <i>rise time</i> do dispositivo equivalente no padrão 20-80.....	67
Figura 52 - Perfil de impedância do DUT com osciloscópio de 500 MHz.....	68
Figura 53 - Perfil de impedância do DUT com osciloscópio de 1 GHz.....	68
Figura 54 - Perfil de impedância do DUT com osciloscópio de 3 GHz.....	69
Figura 55 - Perfil de impedância do DUT com osciloscópio de 6 GHz.....	69
Figura 56 - Perfil de impedância do DUT com osciloscópio de 9 GHz.....	70
Figura 57 - Perfil de impedância do DUT com osciloscópio de 12 GHz.....	70
Figura 58 - Perfil de impedância do DUT com osciloscópio de 18 GHz.....	71
Figura 59 - Perfil de impedância do DUT com osciloscópio de 21 GHz.....	71
Figura 60 - Perfil de impedância do DUT com osciloscópio de 24 GHz.....	72
Figura 61 - Perfil de impedância do DUT com osciloscópio de 27 GHz.....	72
Figura 62 - Perfil de impedância do DUT com osciloscópio de 30 GHz.....	73
Figura 63 - Perfil de impedância do DUT com osciloscópio de 33 GHz.....	73

Figura 64 - Fluxograma da metodologia proposta.....	78
---	----

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Faixa de preços dos componentes dos setups de testes.....	56
Tabela 2 - Perfis de impedância medidos e valores nominais.....	74
Tabela 3 - Resultados de tempo de subida no padrão 10-90 para estimativa de banda do DUT..	75
Tabela 4 - Resultados de tempo de subida no padrão 20-80 para estimativa de banda do DUT..	75
Tabela 5 - Variação da banda de frequência do osciloscópio.....	77

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

- BERT – *Bit Error Rate Tester* (Testador de Taxa de Erro de Bit)
- BW – Largura de banda da frequência.
- CRC – Redundância cíclica
- DUT – *Device under Test* (Dispositivo em teste)
- DE – Dispositivo Equivalente
- dB – Decibel
- FFT – Transformada Rápida de Fourier
- Gbps – Gigabits por segundo
- GHz – Giga-hertz
- mV – Medida de tensão milivolts
- NRZ – *Non-return-to-zero* (Não-retorna-a-zero)
- NRZI – *Non-return-to-zero-inverted* (Não-retorna-a-zero-invertido)
- Ohms ( $\Omega$ ) – Medida de resistência
- PCB – *Printed Circuit Board* (Placa de circuito impresso)
- PRBS – Sequencia binária pseudorrandômica
- ps – Picosegundos
- RT – *Rise time* (tempo de subida)
- SMA – SubMiniature version A, conector de RF
- SMP – SubMiniature version P, conector de RF
- SNR – *Signal to Noise* (Relação sinal-ruído)
- SS - SuperSpeed
- TDR – *Time-domain reflectometer* (Reflectômetro no domínio do tempo)
- TDT – *Time Domain Transmission* (Transmissão no domínio do tempo)
- USB – Universal Serial Bus
- USB-C – Padrão de conexão do USB.
- USB-IF – *USB Implementers Forum* (Fórum dos implementadores USB)
- USB 2.0 – Padrão de comunicação do USB com taxa de dados até 450Mbps
- USB 3.0 – Padrão de comunicação do USB com taxa de dados até 5Gbps
- USB 3.2 – Padrão de comunicação do USB com taxa de dados entre 5Gbps a 10 Gbps
- VNA – *Vector Network Analyzer* (Analisador Vetorial de Rede)
- VSWR – *Voltage Standing Wave Ratio* (Relação de onda estacionária de tensão)

## SUMÁRIO

<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>14</b>
<b>1 REFERENCIAL TEÓRICO</b> .....	<b>17</b>
1.1 TRANSMISSÃO DE DADOS NA COMUNICAÇÃO DIGITAL .....	17
<b>1.1.1 Codificação NRZ</b> .....	<b>18</b>
1.2 O PADRÃO DE COMUNICAÇÃO USB 3.0.....	20
<b>1.2.1 Técnicas de caracterização de barramentos de alta velocidade</b> .....	<b>21</b>
1.3 ANÁLISE DE SINAIS .....	23
<b>1.3.1 TDR</b> .....	<b>23</b>
<b>1.3.2 Osciloscópio</b> .....	<b>25</b>
<b>1.3.3 BERT</b> .....	<b>25</b>
<b>1.3.4 VNA</b> .....	<b>26</b>
<b>1.3.5 Parâmetros S</b> .....	<b>27</b>
<b>2 MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	<b>29</b>
2.1 MÉTODO PROPOSTO .....	29
2.2 MATERIAIS UTILIZADOS .....	30
<b>3 METODOLOGIA PROPOSTA</b> .....	<b>32</b>
3.1 EQUIPAMENTOS DE CONFORMIDADE.....	32
<b>3.1.1 Arquitetura do USB 3.2</b> .....	<b>32</b>
<b>3.1.2 O dispositivo sob teste (DUT)</b> .....	<b>33</b>
<b>3.1.3 Teste de Interconexão USB</b> .....	<b>35</b>
<b>3.1.4 Ferramenta de conformidade com o USB tipo C</b> .....	<b>37</b>
3.2 EQUIPAMENTOS DE PRÉ-CONFORMIDADE .....	39
3.3 ENSAIOS PRELIMINARES .....	41
<b>3.3.1 Configuração do osciloscópio</b> .....	<b>42</b>
<b>3.3.2 Calibração do TDR</b> .....	<b>43</b>
<b>3.3.3 Ensaios com cabo simples</b> .....	<b>47</b>
<b>3.3.4 Análise do <i>fixture</i></b> .....	<b>49</b>
3.4 APLICAÇÃO DA METODOLOGIA PROPOSTA E TESTES FINAIS .....	53
<b>3.4.1 Caracterização normativa do dispositivo a ser testado</b> .....	<b>53</b>
<b>3.4.2 Estudo da viabilidade técnica do setup de testes</b> .....	<b>54</b>
<b>3.4.3 Estudo de viabilidade econômica do setup de testes</b> .....	<b>56</b>

<b>3.4.4 Escolha do dispositivo de comparação .....</b>	<b>57</b>
<b>3.4.5 Realização dos testes .....</b>	<b>57</b>
<b>4 ANÁLISE DOS RESULTADOS .....</b>	<b>74</b>
4.1 PERFIL DE IMPEDÂNCIA.....	74
4.2 ESTIMATIVA DE BANDA DE FREQUÊNCIA DO DUT .....	74
4.3 ESTIMATIVA DA BANDA DE FREQUÊNCIA DO DE .....	76
4.4 COMPARAÇÃO DE RESULTADOS COM O DISPOSITIVO EQUIVALENTE .....	76
4.5 VARIAÇÃO DA BANDA DO OSCILOSCÓPIO.....	77
4.6 FLUXOGRAMA DA METODOLOGIA.....	78
<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>79</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>81</b>

## INTRODUÇÃO

O Universal Serial Bus (USB) é um dos barramentos mais populares na atualidade, utilizado em uma variedade de aplicações que incluem dispositivos de armazenamento, periféricos de entrada e saída, câmeras digitais e smartphones, entre outros. A sua interface simples e fácil de usar tornou-o um padrão amplamente adotado pela indústria, oferecendo alta velocidade de transferência de dados e compatibilidade com várias plataformas (INTEL CORPORATION, 2015).

Entre os tipos de USB disponíveis no mercado, o USB-C, que se refere apenas ao conector físico, se destaca por oferecer diversas vantagens em relação a outras conexões. Ele é reversível, o que significa que não importa como o cabo é inserido, ele sempre se conectará corretamente, permite transferências de dados e energia em alta velocidade, suportando até 100 watts de potência e pode ser utilizado para carregar dispositivos móveis, oferecendo maior comodidade e versatilidade (USB IMPLEMENTERS FORUM, 2022b).

Outra variação do USB que merece destaque é o USB 3.0, um padrão de transferência de dados que utiliza padrão de conexão USB-C e oferece vantagens em relação a outros padrões USB. Ele é capaz de transmitir dados a uma velocidade de até 5 Gbps, o que é dez vezes mais rápido do que o USB 2.0. Além disso, ele suporta mais energia, o que permite carregar dispositivos mais rapidamente e é compatível com as versões anteriores do USB, permitindo que dispositivos mais antigos sejam conectados a ele (USB IMPLEMENTERS FORUM, 2022a).

Porém, apesar de suas vantagens, os barramentos USB utilizam multiplexação de dois pares de fios para enviar e receber dados e um dos maiores desafios que ele enfrenta é justamente garantir essa função. Esse problema ocorre devido a diversos fatores que podem interferir na integridade do sinal enviado, como por exemplo: interferência eletromagnética, atraso de propagação, erro de sincronização e perdas de dados, ressonância e *crosstalk* (JOHNSON e GRAHAM, 1993).

Consequentemente, existem normas que visam assegurar a integridade do sinal nas taxas de transmissão adequadas que são propostas pelo *USB Implementers Forum* (USB-IF), entidade desenvolvedora do padrão USB (USB IMPLEMENTERS FORUM, 2022a). Porém, verificar a conformidade de novos dispositivos é muito difícil para desenvolvedores ou empresas do segmento de soluções para este meio de comunicação, pois os equipamentos empregados para isso não são financeiramente acessíveis, há pouco material de referência para

verificação dos testes necessários e a descrição desse processo é orientada apenas para laboratórios especializados.

Portanto, este trabalho propõe uma metodologia para a coleta e análise de parâmetros relativos à integridade de sinal de barramentos digitais de alta velocidade da tecnologia USB 3.0 utilizando a técnica de reflectometria no domínio do tempo, possibilitando assim, um caminho viável para análise de pré-conformidade de um produto em fase de desenvolvimento.

Para alcançar esse objetivo, serão entregues: um referencial teórico abordando a transmissão de dados em sistemas de comunicações digitais, o padrão de comunicação USB, assim como os parâmetros S e TDR; um levantamento dos equipamentos necessários compatíveis com a aplicação, bem como as métricas necessárias para a análise dos testes; um cenário de testes funcional e acessível; e um fluxograma que descreve o cenário de teste e a metodologia a ser utilizada para as validações e testes dos barramentos USB.

Assim, a importância deste trabalho é justificada pela contribuição no estado da arte e da técnica de uma metodologia viável para validação de barramentos digitais de alta velocidade em placas de circuito impresso (PCB's) e que pode ser empregado durante o processo de desenvolvimento e testes de dispositivos compatíveis com as atuais tecnologias de barramento em alta velocidade, reduzindo a dependência de recursos tecnológicos avançados, proprietários e de difícil acesso.

Para ordenação dos assuntos a serem abordados de forma clara e objetiva, este trabalho está organizado em seções:

Seção I – Referencial teórico: trata dos conceitos teóricos relacionados ao projeto. Ele começa apresentando a ideia da transmissão de dados em comunicação digital com foco na técnica de codificação NRZ (*Non-return-to-zero*), seguida das características do padrão de comunicação USB 3.0 e, por fim, instrumentos de análise de sinais por domínio do tempo e da frequência (TDR, osciloscópio, BERT e VNA).

Seção II – Materiais e métodos: aborda o tipo de pesquisa a ser aplicada, percorre resumidamente o processo implementado para elaboração da metodologia e apresenta os materiais utilizados durante o desenvolvimento do trabalho.

Seção III – Implementação: apresenta os procedimentos da elaboração da metodologia para análise de parâmetros de integridade de sinais em barramentos USB 3.0, destacando as subseções: Equipamentos de conformidade; Equipamentos de pré-conformidade; Ensaio preliminares; e Aplicação da metodologia proposta (testes finais).

Seção IV – Análise dos resultados: expõe a análise dos resultados alcançados a partir da realização de todos os ensaios conduzidos no decorrer da implementação da metodologia proposta no escopo deste estudo, incluindo análise do perfil de impedância, estimativa de banda de frequência do DUT e do dispositivo equivalente, comparação de resultado dos dois e variação da banda de frequência do osciloscópio.

## 1 REFERENCIAL TEÓRICO

### 1.1 TRANSMISSÃO DE DADOS NA COMUNICAÇÃO DIGITAL

Ao se falar de transmissão de dados é comum se deparar com a classificação do meio de transmissão em dois tipos: a guiada, também conhecida como meio-físico, e a não guiada, ou meio não-físico (STALLINGS, 2013, p.67). Em ambas pode-se ter uma transmissão de dados analógica ou digital. Na transmissão analógica, as informações são enviadas em forma de sinais contínuos que variam de acordo com a informação a ser transmitida. Já na transmissão digital, as informações são convertidas em bits, que podem ser transmitidos como pulsos elétricos. Por outro modo, na transmissão guiada, tem-se como exemplo o meio de transmissão cabeado, sendo que neste o transporte de dados pode ser realizado usando diferentes técnicas que modificam o sinal elétrico ou óptico, de forma a permitir transmissão de dados em alta velocidade. Algumas delas são:

a) Modulação: técnica utilizada para transmitir informações em uma onda portadora de alta frequência. A amplitude, frequência ou fase da onda portadora são modificadas de acordo com os dados a serem transmitidos (PROAKIS e SALEHI, 2008, p.15).

b) Equalização: técnica utilizada para compensar os efeitos de distorção do sinal, como atenuação, distorção de fase e *crosstalk*. Essa técnica consiste em aplicar filtros que corrigem as distorções causadas pelo meio de transmissão (PROAKIS e SALEHI, 2008, p.15).

c) Codificação de linha: técnica utilizada para representar os dados em um formato que minimize a ocorrência de erros de transmissão. Essa técnica envolve a adição de bits extras ao sinal, permitindo a detecção e correção de erros (FOROUZAN, 2013, p.101).

Existem três elementos cruciais que devem ser considerados para que o reconhecimento do sinal pelo receptor seja um sucesso: a relação sinal-ruído, a taxa de dados e a largura de banda (STALLINGS, 2013, p.141). A relação sinal-ruído (SNR) é uma medida que compara a intensidade do sinal transmitido em um canal de comunicação com a intensidade do ruído presente no mesmo canal, expressa em uma relação matemática entre a potência do sinal e a potência do ruído. A taxa de dados é a quantidade de dados que podem ser transmitidos através de um canal de comunicação em um determinado intervalo de tempo e dada como uma medida de desempenho de uma conexão de comunicação, expressa em bits por segundo. Por fim, a largura de banda representa a quantidade de informações que podem ser transmitidas em um canal de comunicação em um determinado período de tempo, geralmente medida em Hertz

(Hz) e representa a diferença entre as frequências mínima e máxima que um canal pode transmitir.

Excluindo os três fatores anteriores, quando se mantêm todos os outros elementos constantes, as seguintes afirmações são verdadeiras: um aumento na taxa de dados conduz a um aumento na taxa de erros de bit (BER), enquanto um aumento na proporção sinal-ruído (SNR) leva a uma diminuição de BER. Além disso, um aumento na largura de banda possibilita um aumento na taxa de erros de dados. É importante destacar que há outro elemento que pode melhorar o desempenho: o esquema de codificação (STALLINGS, 2013, p.142).

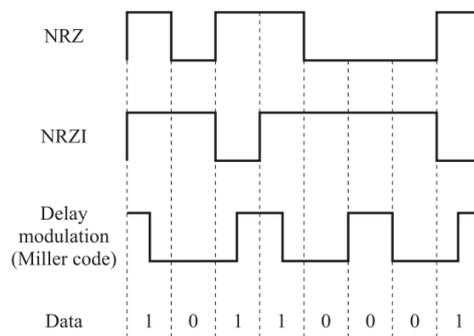
Dentre as muitas abordagens de codificação que podem ser utilizadas, para este trabalho, a codificação NRZ merece destaque já que esta é amplamente utilizada em transmissões de dados em comunicações digitais cabeadas, incluindo o padrão USB.

### 1.1.1 Codificação NRZ

A técnica de codificação de linha NRZ (*Non-Return-to-Zero*) é amplamente utilizada em transmissões de dados em comunicações digitais cabeadas. Essa técnica é caracterizada pela manutenção da polaridade do sinal elétrico ou óptico durante todo o período de transmissão do bit. (STALLINGS, 2013, p.144). Ou seja, se um bit for representado por um sinal positivo, a polaridade do sinal permanecerá positiva durante todo o período do bit, enquanto que se um bit for representado por um sinal negativo, a polaridade do sinal permanecerá negativa durante todo o período do bit.

A Figura 1 mostra três sinais de banda base distintos juntamente com a sequência de dados associada. O primeiro sinal é conhecido como NRZ, enquanto o segundo sinal é chamado de NRZI (*Non-Return-to-Zero Invertido*). O sinal NRZI difere do sinal NRZ, pois as mudanças de amplitude ocorrem apenas quando é transmitido um 1. Quando um 0 é transmitido, o nível de amplitude permanece constante. (PROAKIS e SALEHI, 2008, p.115).

Figura 1 – Sinais de banda base.



Fonte: (SALEHI e MASOUD, 2008, p.115).

A técnica NRZ é simples e eficiente, permitindo a transmissão de dados em alta velocidade e com baixa taxa de erro. No entanto, em suas configurações polares, ela pode ser afetada por ruídos e interferências elétricas, além de não possuir um mecanismo de sincronização (FOROUZAN, 2013, p.108)

Um exemplo de utilização da técnica NRZ em comunicações digitais cabeadas é o padrão de comunicação USB (Universal Serial Bus). O USB é um padrão de comunicação amplamente utilizado para conectar dispositivos eletrônicos, como impressoras, mouses, teclados, smartphones, entre outros, a um computador ou a outros dispositivos eletrônicos.

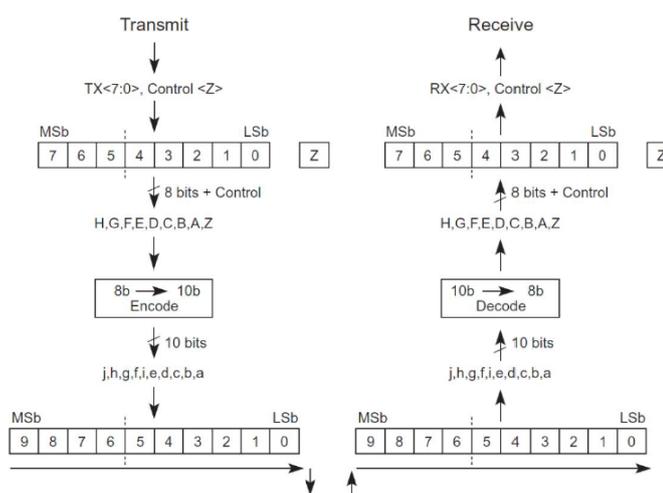
O USB utiliza a técnica NRZ para codificar os dados que são transmitidos entre os dispositivos. Nesse caso, cada bit é codificado em um sinal elétrico ou óptico de polaridade constante. Além disso, o USB utiliza uma técnica de modulação denominada "8b/10b", que combina a técnica NRZ com uma técnica de controle de erros para garantir uma transmissão de dados confiável e segura (STALLINGS, 2013, p.513). A codificação 8b/10b utiliza uma tabela de codificação que associa cada grupo de 8 bits a um código de 10 bits. A tabela de codificação é projetada para garantir que os códigos resultantes tenham um equilíbrio aproximadamente igual entre 1s e 0s, para que a linha de transmissão possa manter um equilíbrio adequado entre esses dois estados. Esta codificação também inclui alguns códigos especiais que são usados para fins de controle. Esses códigos são usados para indicar o início e o fim de um pacote de dados, bem como para detectar erros de transmissão. Esses códigos especiais também garantem que a sequência de bits transmitida seja sempre limitada a um certo número máximo de bits idênticos consecutivos.

O processo de codificação 8b/10b é realizado da seguinte maneira: um byte, 8 bits, é dividido em duas metades de 4 bits cada. Cada uma dessas metades é então mapeada em um

código de 5 bits usando a tabela de codificação. As duas metades de 5 bits são então combinadas para formar um código de 10 bits que é transmitido pela linha de transmissão.

Na Figura 2 é mostrada a transmissão e recepção de uma informação pela codificação 8b/10b. Onde, no grupo de 8 bits se acrescentam 2 bits de controle ao ser feita a codificação, totalizando 10 bits. Os códigos de 10 bits são então divididos em duas metades de 5 bits, cada uma delas é mapeada de volta para um byte de 8 bits usando a tabela de decodificação conforme explicado anteriormente. As duas metades de 8 bits são então combinadas para formar o byte original de 8 bits.

Figura 2 – Mapeamento de caractere para símbolo (técnica 8b/10b).



Fonte: (USB 3.2 SPECIFICATION, 2022, p.57).

A técnica "8b/10b" permite a codificação de 8 bits em um conjunto de 10 bits, o que garante uma boa relação entre a largura de banda e a eficiência da transmissão de dados. Além disso, essa técnica inclui informações de sincronização no sinal garantindo a detecção correta do início e do fim de cada bit. O padrão de codificação mencionado é fundamental para a implementação dos padrões USB, incluindo o USB 3.0, que é o foco deste trabalho.

## 1.2 O PADRÃO DE COMUNICAÇÃO USB 3.0

O padrão de comunicação USB 3.0 é uma versão atualizada do USB (Universal Serial Bus) que oferece velocidades de transferência de dados mais rápidas do que as versões anteriores. Ele suporta taxas de transferência de até 5 Gbps (Gigabits por segundo), que é dez vezes mais rápido do que o USB 2.0, que chega a 480 Mbps são (USB IMPLEMENTERS FORUM, 2022a).

A fim de alinhar a nomenclatura dos padrões USB com as velocidades de transferência de dados correspondentes a cada padrão este padrão passou a ficar conhecido como USB 3.2 Gen 1. Ele também apresenta algumas melhorias de energia, como suporte para energia aumentada para dispositivos de alto desempenho e para dispositivos que exigem mais energia do que as especificações anteriores permitiam. Nessa tecnologia, existem vários itens que devem ser garantidos para se ter uma boa integridade do sinal transmitido. Alguns dos mais importantes são (USB IMPLEMENTERS FORUM, 2022a):

a) Taxa de transferência de dados (ou taxa de bits): é a velocidade na qual os dados são transferidos de um dispositivo para outro. Como dito anteriormente, essa taxa de transferência de dados é de até 5 Gbps para o USB 3.0.

b) Potência do sinal (ou amplitude do sinal): é a intensidade do sinal elétrico que é enviado pelos dispositivos USB. A potência do sinal para o USB 3.0 é de até 400 mV.

c) Relação sinal-ruído (ou SNR): é a relação entre a potência do sinal e a potência do ruído de fundo. Uma relação sinal-ruído maior garante uma melhor integridade do sinal. A relação sinal-ruído para USB 3.0 é de pelo menos 3,3 dB.

d) Equalização do sinal: é o processo de ajuste do sinal elétrico para compensar o efeito da atenuação e distorção do sinal durante a transmissão e minimizar o efeito do *jitter*. O padrão USB 3.0 inclui vários recursos de equalização, incluindo equalização de pré-ênfase e equalização adaptativa, sendo a última usada para compensar as variações na resposta do canal de transmissão ao longo do tempo. Isso é necessário porque o canal pode sofrer mudanças devido a fatores externos, como interferência eletromagnética ou a presença de outros dispositivos nas proximidades. A equalização adaptativa usa um algoritmo que monitora a qualidade do sinal recebido e ajusta a equalização do sinal de transmissão para compensar essas variações.

e) Controle de erros: é o processo de detecção e correção de erros de transmissão de dados. O padrão USB 3.0 utiliza várias técnicas de controle de erros, incluindo verificação de redundância cíclica (CRC).

### **1.2.1 Técnicas de caracterização de barramentos de alta velocidade**

Dentro das especificações do padrão de comunicação USB, que incluem o padrão de conexão tipo C, é possível encontrar diversas tabelas que definem os valores de confiabilidade de parâmetros exigidos ao conector e cabo dessa tecnologia, como por exemplo a Figura 3, que apresenta os requerimentos de integridade para o par diferencial D+/D- do conector USB tipo

C, como impedância diferencial, atraso de propagação, atenuação do par, diferença de atraso dentro do par, e resistência DC do par. Outro exemplo é a Figura 4, que mostram os requisitos mínimos que devem ser obtidos para conjuntos de adaptadores USB tipo C do USB 3.0. Sendo assim são necessárias técnicas que caracterizem o barramento para o USB 3.0 afim de medir e analisar o desempenho deste barramento de comunicação durante a transmissão de dados de alta velocidade. Essas técnicas ajudam a identificar possíveis problemas de integridade do sinal, como atrasos, reflexões e atenuações, e a assegurar que o barramento esteja funcionando corretamente.

Figura 3 – Requerimentos de integridade para o par diferencial D+/D- do USB tipo C.

Items	Descriptions and Procedures	Requirements
Differential Impedance	EIA 364-108 This test ensures that the D+/D- lines of the cable assembly have the proper impedance. For the entire cable assembly.	75 ohms min and 105 ohms max. 400 ps rise time (20%-80%).
Propagation Delay	EIA 364-103 The purpose of the test is to verify the end-to-end propagation of the D+/D- lines of the cable assembly.	10 ns max for USB Type-C to Micro-B cable assembly; 20 ns max for all other USB Type-C to legacy USB cable assemblies. 400 ps rise time (20%-80%).
Intra-pair Skew	EIA 364 - 103 This test ensures that the signal on both the D+ and D- lines of cable assembly arrive at the receiver at the same time.	100 ps max. 400 ps rise time (20%-80%).
D+/D- Pair Attenuation	EIA 364 - 101 This test ensures the D+/D- pair of a cable assembly is able to provide adequate signal strength to the receiver in order to maintain a low error rate.	$\geq -1.52$ dB @ 50 MHz $\geq -2.03$ dB @ 100 MHz $\geq -2.91$ dB @ 200 MHz $\geq -4.35$ dB @ 400 MHz
D+ or D- DC Resistance	This test ensures the D+/D- has the proper DC resistance range in order to predict the EOP level and set the <a href="#">USB 2.0</a> disconnect level.	3.5 ohms max.

Fonte: (USB IMPLEMENTERS FORUM, 2022b, p.121)

Figura 4 - Alvos de design para conjuntos de adaptadores USB tipo C para USB 3.0.

Items	Design Targets
Differential Return Loss	$\leq -15$ dB to 5 GHz Normalized with 85 ohms.
Differential Insertion Loss	$\geq -2.4$ dB to 2.5 GHz, $\geq -3.5$ dB to 5 GHz
Differential NEXT between SuperSpeed Pairs	$\leq -40$ dB to 2.5 GHz $\leq -34$ dB at 5 GHz
Differential NEXT and FEXT between D+/D- and SuperSpeed Pairs	$\leq -30$ dB to 2.5 GHz

Fonte: (USB IMPLEMENTERS FORUM, 2022b p.125)

Algumas das técnicas de caracterização de barramentos de alta velocidade para o USB 3.0 são (USB IMPLEMENTERS FORUM, 2022a):

a) Análise de resposta de impulso: essa técnica envolve o envio de um pulso elétrico pelo barramento e a análise da resposta do barramento ao pulso. Isso ajuda a identificar a presença de reflexões ou atenuações no barramento.

b) Análise de *crosstalk*: essa técnica envolve a medição da interferência eletromagnética entre os canais de transmissão adjacentes no barramento. Isso ajuda a identificar possíveis problemas de diafonia que podem afetar a integridade do sinal.

c) Análise de *jitter*: essa técnica envolve a medição da variação no tempo de chegada dos bits de dados no receptor. O *jitter* pode ser causado por várias fontes, como atrasos de transmissão, reflexões ou interferência eletromagnética.

d) Análise de ruído: essa técnica envolve a medição do ruído elétrico no barramento durante a transmissão de dados. O ruído pode ser causado por várias fontes, como fontes de alimentação instáveis ou interferência eletromagnética.

e) Análise de olho: essa técnica envolve a medição da forma de onda do sinal de transmissão usando um osciloscópio. Isso ajuda a identificar possíveis problemas de integridade do sinal, como atrasos, reflexões e atenuações.

É importante destacar que os principais problemas de integridade do sinal estão associados à variação da impedância característica ao longo do barramento, portanto a análise da impedância no barramento do USB é fundamental para garantir o adequado desempenho dessa tecnologia.

### 1.3 ANÁLISE DE SINAIS

A análise de sinais envolve a investigação e interpretação de características e propriedades de sinais, com o objetivo de obter informações úteis sobre o comportamento e conteúdo deles. Existem diversas técnicas de análise de sinais que são utilizadas para essa finalidade. Nesta subseção do trabalho serão abordados instrumentos que permitem análises de sinais tanto por domínio do tempo quanto por domínio da frequência.

#### 1.3.1 TDR

TDR do inglês *Time-Domain Reflectometer*, em português Reflectômetro no Domínio do Tempo, é um instrumento de teste eletrônico utilizado para medir a impedância de cabos de transmissão, linhas de transmissão ou outros condutores elétricos. Seu funcionamento é baseado na transmissão de um sinal elétrico ou um pulso de onda através do condutor, medindo o tempo que leva para o sinal ou pulso refletido voltar (TEKTRONIX, 2023a).

Figura 5 – TDR diferencial da marca Picotest, modelo J2154A.

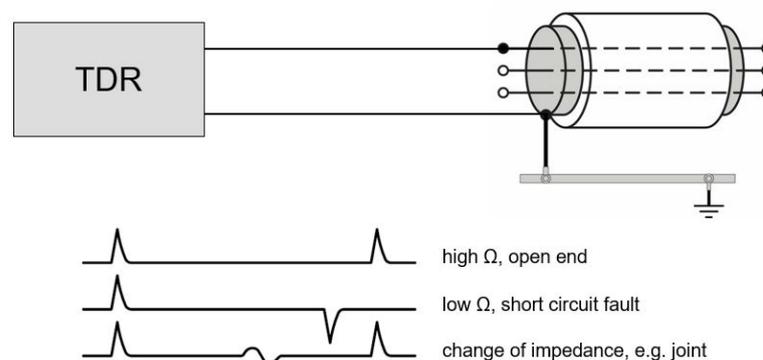


Fonte: (Picotest, 2023)

Na Figura 5 é apresentado um modelo de TDR diferencial de baixo custo capaz de transformar o osciloscópio em um testador de trilhas de PCB, cabos e conectores. Para se obter as medições TDR de modo diferencial e de terminação única, os conectores 1 e 3 conectam-se aos canais do osciloscópio, enquanto os conectores 2 e 4 conectam-se às pontas de prova (PICOTEST, 2023).

É possível entender seu funcionamento quando essas pontas de prova são conectadas paralelamente a um cabo, como é visto na Figura 6. Quando um pulso elétrico é emitido pelo TDR, a reflexão do pulso é gerada pela mudança de impedância entre esses dois caminhos. Dessa forma, qualquer interrupção, mudança de impedância ou extremidade do cabo é identificada pelo TDR. Caso o pulso de baixa tensão percorra o cabo e encontre uma extremidade do cabo ou uma interrupção (como um corte), ele será refletido positivamente. Já em um ponto de curto-circuito, esse impulso de baixa tensão é refletido negativamente. Quando ocorre uma alteração da impedância no cabo, essa mudança será exibida no TDR como um S deitado (THE BASICS OF TIME DOMAIN REFLECTOMETRY, 2018).

Figura 6 – Conexão dos terminais do TDR a um cabo.



Fonte: (HV TECHNOLOGIES, INC, 2018).

Ainda assim, é importante destacar que O TDR não é apenas uma estação de radar para linhas de transmissão, que emite pulsos pela linha e detecta as reflexões de discontinuidades de impedância. Ele também é um instrumento que pode fornecer diretamente modelos de topologia de primeira ordem e modelos comportamentais de parâmetro S (BOGATIN e RESSO, 2009, p.3).

### 1.3.2 Osciloscópio

O osciloscópio é um instrumento de teste de circuito eletrônico que permite a visualização sinais elétricos em um circuito como uma função do tempo ou da frequência, disparando em um determinado ponto da forma de onda de modo que resulte em uma imagem estacionária (HOROWITZ e HILL, 2017, p. 1157).

Na Figura 7 é apresentado um exemplo de osciloscópio digital de bancada. Seu funcionamento básico é digitalizar o sinal de entrada após os estágios iniciais de ganho programável e limitação de banda, capturar as amostras em uma memória *buffer* circular rápida, e então usar um processador (ou múltiplos processadores) para fazer todo o processamento de sinais, medições, conversão para uma exibição significativa, interface do usuário e I/O (HOROWITZ e HILL, 2017, p. 1161).

Figura 7 – Osciloscópio Digital de bancada modelo TBS100C.



Fonte: (TEKTRONIX, 2023b)

### 1.3.3 BERT

O BERT, do inglês *Bit Error Rate Tester* (Testador de Taxa de Erro de Bit) é um método de teste para circuitos de comunicação digital que usa padrões de estresse

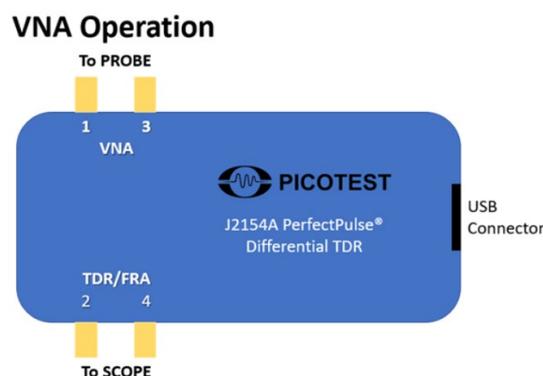
predeterminados, consistindo em uma sequência de uns e zeros lógicos gerados por um gerador de padrões de teste. Um BERT geralmente consiste em um transmissor gerador de PRBS (sequências binárias pseudorrandômicas), um comparador e um contador de taxa de erro de bit e um link de comunicação serial (SASTRY et al., 2015).

Este instrumento funciona transmitindo e recebendo padrões de bits que são comparados para determinar a taxa de erro de bits.

### 1.3.4 VNA

O VNA, do inglês *Vector Network Analyzer* (Analisador Vetorial de Rede), é empregado em dispositivos completos para realizar medições que não podem ser realizadas por outros equipamentos de medição de RF. Um VNA realiza medições de transmissão, como coeficiente de transmissão, perda de inserção e ganho, além de medições de reflexão, como coeficiente de reflexão, VSWR (parâmetro em sistemas de RF que mede o descasamento de impedância) e perda de retorno. Também pode efetuar medições de impedância e capturar os parâmetros S (parâmetros de dispersão) S11, S12, S21, S22, os quais representam a influência de um dispositivo em um sinal. Esse instrumento proporciona sinais de estímulo calibrados para a rede de RF ou para o dispositivo em teste e, com os receptores, mede a resposta ao longo da frequência, fornecendo informações sobre a fase e amplitude do vetor de resposta. (ROHDE&SCHWARZ, 2023).

Figura 8 – Esquema de conexão do J2154A para operar como VNA.



Fonte: (PICOTEST, 2023)

O J2154A *PerfectPulse*, citado anteriormente como um TDR diferencial, também consegue operar como um VNA. Para isso basta conectar o osciloscópio aos conectores 2 e 4 e as pontas de prova aos conectores 1 e 3, como mostra a Figura 8. As funções matemáticas empregam Transformadas Rápidas de Fourier (FFTs) no final do sinal de alta velocidade,

utilizando uma porta de  $50 \Omega$  como sonda e um segundo canal de osciloscópio de  $50\Omega$  como a segunda porta. Essas funções matemáticas apresentam o parâmetro S21. É possível também apresentar o parâmetro S11, mas não S22 ou S21. Essas medições podem ser realizadas tanto em terminação simples quanto diferencial (PICOTEST, 2023).

### 1.3.5 Parâmetros S

Os parâmetros S, também conhecidos como parâmetros de espalhamento, são um conjunto de coeficientes complexos que descrevem a relação entre as portas de um sistema de transmissão e a frequência de operação (POZAR, 2012, p.178). É comumente utilizado em redes de duas portas, ou seja, um circuito elétrico ou eletrônico que possui dois pontos de entrada/saída. Nesta configuração a visualização da matriz S fica mais simples de ser compreendida.

Considerando  $V^-$  a amplitude da onda de tensão refletida da porta e  $V^+$  a amplitude da onda de tensão incidente na porta, a matriz  $[S]$  é definida como (POZAR, 2012, p.178):

$$\begin{bmatrix} V_1^- \\ V_2^- \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1^+ \\ V_2^+ \end{bmatrix} \quad (1)$$

ou

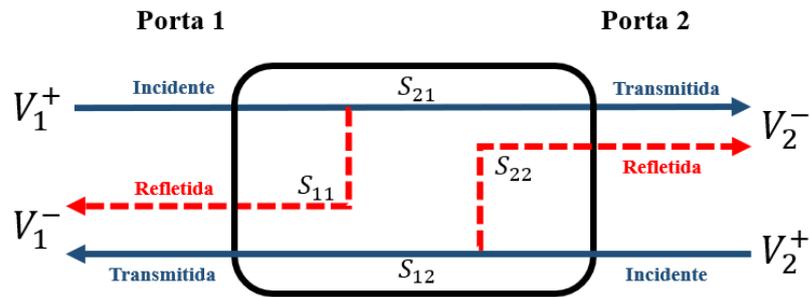
$$[V^-] = [S][V^+] \quad (2)$$

Onde:

- a) S11 é coeficiente que descreve a relação entre a onda refletida na porta 1 (entrada) e a onda incidente na porta 1;
- b) S12 é o coeficiente que descreve a relação entre a onda transmitida da porta 1 para a porta 2 (saída) e a onda incidente na porta 1;
- c) S21 é o coeficiente que descreve a relação entre a onda transmitida da porta 2 para a porta 1 e a onda incidente na porta 2;
- d) S22 é o coeficiente que descreve a relação entre a onda refletida na porta 2 e a onda incidente na porta 2.

Na Figura 9 tem-se uma representação visual dos parâmetros S em uma rede duas portas.

Figura 9 – Diagrama dos parâmetros S em uma rede de duas portas.



Fonte: Autoria própria.

Esses coeficientes podem ser expressos em termos de amplitude e fase, ou como números complexos que incluem tanto a amplitude quanto a fase. Os parâmetros S são frequentemente usados em projetos de circuitos e em análises de sistemas de transmissão, pois permitem prever o comportamento do sistema em diferentes condições de operação (MATTHEWS e FIORE, 2018, p.184). Eles são particularmente úteis em projetos de redes de comunicação, em que é necessário garantir a integridade do sinal em toda a rede.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta seção serão abordados todos os aspectos metodológicos da pesquisa realizada, descrevendo-se os procedimentos necessários para desenvolver uma metodologia baseada na utilização do TDR para analisar parâmetros de integridade de sinais nos barramentos de um dispositivo que possui a tecnologia USB 3.0.

Este trabalho foi uma pesquisa aplicada e teve como objetivo a realização de pesquisa exploratória relacionada ao material bibliográfico. Foram utilizados os procedimentos técnicos de pesquisa bibliográfica e experimental. E, para realizar a sua elaboração, foi empregado o método de abordagem hipotético-dedutivo e o método de procedimento monográfico. Em relação à coleta de dados, foi adotada a documentação indireta e a análise e interpretação de dados ocorreu de forma qualitativa.

Ademais, neste capítulo é retratada a sequência de eventos para a criação da metodologia, desde a pesquisa para caracterização do DUT, verificação de instrumentos de análise de integridade de sinais com custo reduzido, ensaios preliminares com o TDR e ensaios finais para validação da metodologia proposta. A metodologia é comparativa e consiste em etapas que ajudarão na construção do melhor cenário de testes de pré-conformidade para o dispositivo com o padrão USB 3.0, elas são: caracterização do dispositivo a ser testado, determinação do comprimento de borda e da banda mínima dos equipamentos utilizados na análise, estudo de viabilidade de setup, determinação de acessórios que irão compor o setup de testes, escolha de dispositivo para comparação, realização de testes e análises finais.

### 2.1 MÉTODO PROPOSTO

No primeiro passo foi realizada uma pesquisa através das documentações com especificações do padrão USB 3.0 e cabo e conector USB tipo C para categorizar a placa a ser testada (transmissor, receptor, cabo passivo, cabo ativo ou HUB), desta forma, com o DUT categorizado, foi delimitado os equipamentos de conformidade próprios sugeridos pela norma do USB-IF.

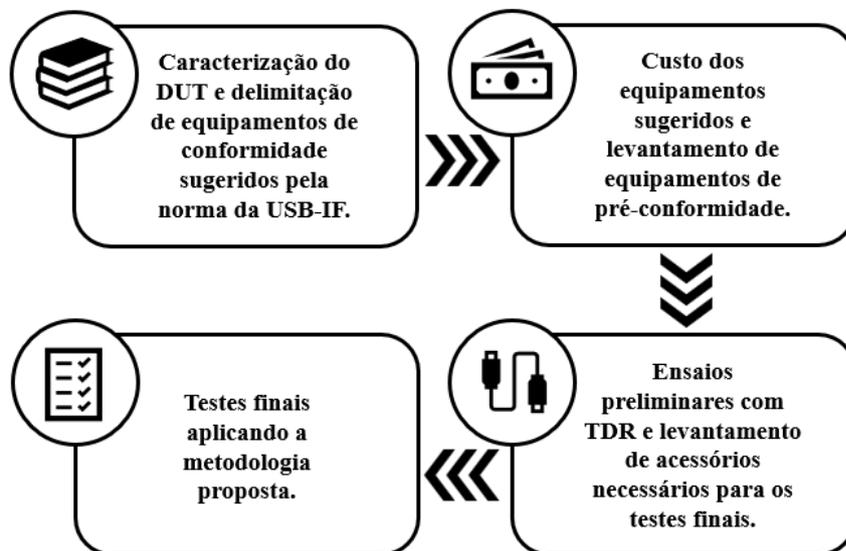
No segundo passo foi realizada uma pesquisa de mercado para saber o custo dos equipamentos levantados no passo anterior e, assim, explorar alternativas de outros equipamentos que não cumpram à risca a norma, mas sejam mais acessíveis e capazes de exercer uma análise de pré-conformidade no DUT, dentre eles o TDR teve o maior destaque.

No terceiro passo foram feitos ensaios preliminares em laboratório com o TDR, onde foi feita a configuração de um setup de testes mais simples para estudar o funcionamento deste

instrumento. Foi feita a calibração do TDR, configuração de outros instrumentos de apoio, como o osciloscópio, ensaios com cabos e levantamento de acessórios necessários (*fixtures*, cabos, pontas de prova etc.) para os testes finais.

No quarto e último passo foi realizado os testes finais aplicando a metodologia proposta, ou seja, foi feito o registro de cada etapa da metodologia, desde a caracterização do DUT até as análises finais dos resultados obtidos nos ensaios. Os testes incluíram a análise do *fixture* escolhido, coletas com DUT e coletas com um dispositivo equivalente ao DUT para efeito de comparação dos resultados. A Figura 10 ilustra um fluxograma do método utilizado para realização deste trabalho.

Figura 10 – Método utilizado no trabalho.



Fonte: Autoria própria.

## 2.2 MATERIAIS UTILIZADOS

Para a elaboração da metodologia e execução dos testes, foram utilizados os materiais listados abaixo:

- Documentos de especificação do padrão USB 3.2 e cabos e conectores USB tipo C;
- 4 cabos SMA para SMP de 18 GHz;
- 4 cabos 2,92mm de 40 GHz;
- 1 TDR diferencial J2154A;
- 1 Osciloscópio MSO 73304DX;
- 2 cargas de 0 ohms;
- 2 cargas de 50 ohms;

- 2 cabos de alimentação USB tipo C para Tipo B;
- 1 cabo USB tipo C *Thunderbolt 3*;
- 1 cabo USB 3.2 Gen 1 tipo C;
- 2 *Fixtures* ZEBAX;
- 2 *Fixtures* WILDER;
- 1 chave de torque.

### 3 METODOLOGIA PROPOSTA

Esta seção apresenta os procedimentos da elaboração da metodologia para análise de parâmetros de integridade de sinais em barramentos USB 3.0. Tais processos foram descritos nas seguintes subseções:

- a) Equipamentos de conformidade;
- b) Equipamentos de pré-conformidade;
- c) Ensaio preliminares;
- d) Aplicação da metodologia proposta (testes finais).

#### 3.1 EQUIPAMENTOS DE CONFORMIDADE

Esta subseção aborda o passo-a-passo para se identificar os equipamentos de conformidade que são sugeridos pelas normas do padrão USB. As informações a seguir foram retiradas dos documentos de especificações do padrão USB 3.2 e especificações do cabo e conector USB tipo C, ambos são encontrados no site do *USB Implementers Forum* (USB-IF).

##### 3.1.1 Arquitetura do USB 3.2

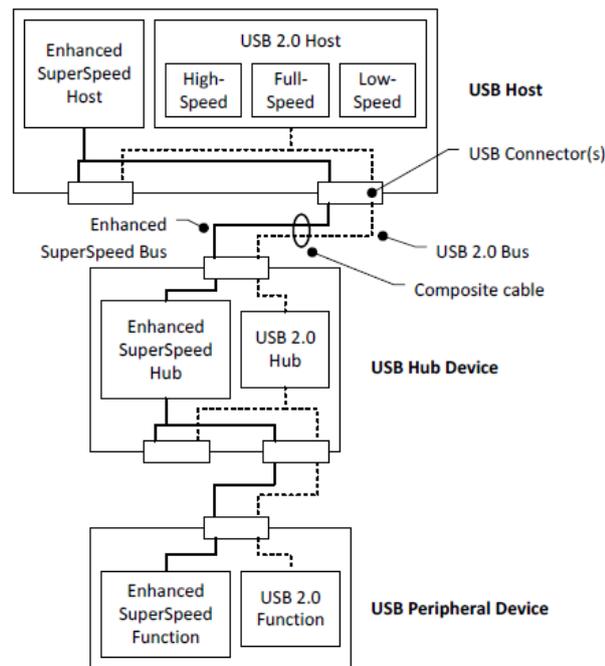
Em primeiro lugar é preciso entender a arquitetura do USB 3.2, sabe-se que ele possui um sistema de barramento duplo (*Dual Bus System*), ou seja, ele pode ter dois barramentos ativos simultaneamente, um barramento USB 2.0 e um barramento *Enhanced SuperSpeed*, sendo o último um termo genérico utilizado pela especificação do USB que se refere a qualquer conjunto válido de recursos estabelecidos para o barramento que opera em paralelo ao barramento USB 2.0 em um sistema USB 3.2.

Na figura 11 tem-se a representação da arquitetura do sistema de barramento duplo do USB 3.2, onde pode-se destacar quatro principais dispositivos que são pertinentes para este trabalho: USB anfitrião, dispositivo concentrador USB, dispositivo periférico USB e interconexão USB.

O USB anfitrião (*USB Host*) é um dispositivo que controla e gerencia a comunicação com outros dispositivos conectados a ele por meio do barramento USB. Ele é responsável por iniciar e coordenar as transações de dados entre o computador ou dispositivo principal e os dispositivos periféricos conectados. O USB Host fornece energia e estabelece a comunicação com os dispositivos USB.

O dispositivo concentrador USB (*USB Hub Device*) é um dispositivo que expande o número de portas USB disponíveis em um sistema. Ele permite a conexão de vários dispositivos USB a uma única porta USB do *host*. O hub USB atua como um ponto central, permitindo que vários dispositivos sejam conectados e compartilhem a largura de banda disponível.

Figura 11 – Arquitetura de sistema de barramento duplo USB 3.2.



Fonte: (USB IMPLEMENTERS FORUM, 2022b)

O dispositivo periférico USB (*USB Peripheral Device*) é qualquer dispositivo que possa ser conectado a um host USB ou a um hub USB. Esses dispositivos periféricos variam amplamente e incluem dispositivos como teclados, mouses, impressoras, câmeras, dispositivos de armazenamento externo, entre outros. Eles dependem do host ou do hub para fornecer energia e comunicação.

Já a interconexão USB (*USB Interconnect*) refere-se ao sistema de conexão física e lógica entre dispositivos USB. Isso inclui os cabos, conectores e protocolos de comunicação que permitem a transferência de dados e fornecimento de energia entre dispositivos USB. A interconexão USB é padronizada e permite a conectividade fácil e a interoperabilidade entre dispositivos USB de diferentes fabricantes.

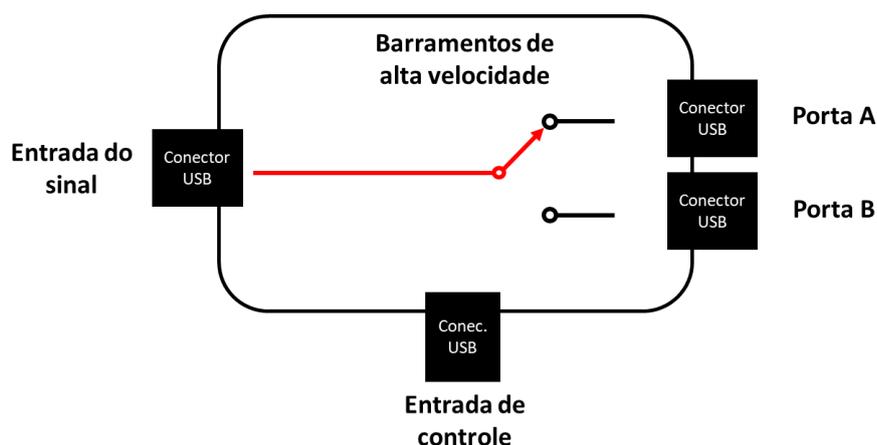
### 3.1.2 O dispositivo sob teste (DUT)

Tendo conhecimento dos dispositivos que compõem a arquitetura do USB 3.2, é possível classificar o dispositivo sob teste, ou *Device Under Test (DUT)*, ou seja, entendendo a

funcionalidade do protótipo que se deseja validar pode-se categorizá-lo dentro dos dispositivos citados anteriormente.

Neste trabalho a placa que será validada nos testes de conformidade é um protótipo que tem como funcionalidade a multiplexação de barramentos de alta velocidade que se caracterizam como barramentos USB 3.0. A Figura 12 mostra um diagrama que apresenta de forma simples o funcionamento desse dispositivo.

Figura 12 – Diagrama de funcionamento do DUT



Fonte: Autoria própria.

A placa possui quatro portas USB tipo C, sendo uma delas para entrada do sinal e duas portas de recepção do sinal. No circuito deste dispositivo há um multiplexador que irá chavear o sinal para a porta A ou B e é através da porta de controle que será definida qual porta será ativada para receber o sinal. O sinal transmitido deve ser recebido pela porta ativada mantendo significativamente sua integridade, sem perdas ou acréscimo nas larguras de banda, impedâncias e outros fatores que podem denegrir a informação enviada.

Sendo a capacidade do protótipo, é improvável que ele se caracterize como um *host*, visto que, para isso ele deveria ser capaz de solicitar ou consumir serviços fornecidos por um dispositivo. Ele também não pode ser considerado um *Peripheral Device* já que para isto, o DUT deveria ser capaz fornecer serviços a um dispositivo conectado a ele. Dessa mesma forma, ele não se encaixa na categoria de *Hub Device* já que o hub participa ativamente na comunicação entre os dispositivos inseridos nele, ou seja, ele gerencia a troca de informações entre os dispositivos. Se o *host* quiser interagir o hub irá silenciar todos os outros *devices* para que todos recebam a mensagem e caso um *device* tenha que transmitir dados ao *host*, o hub bloqueia os outros *devices* e abre um caminho de conexão direto para *host*.

Ademais, cabe classificá-lo como uma interconexão USB, já que ele é transparente para o protocolo USB, ou seja, não existe uma troca de mensagens entre o canal USB multiplexado e o DUT.

### 3.1.3 Teste de Interconexão USB

Com a categorização do DUT, pode-se buscar formas de testá-lo, nas especificações do USB-IF, delimitando a busca apenas a interconexões USB. Para isso é preciso entender a forma como o USB-IF organiza as documentações referentes a especificações e normas do padrão USB.

Existem dois tipos de documentações: especificações referentes ao protocolo de comunicação USB e arquitetura, e especificações referente a cabos e conectores USB. O primeiro tipo se refere a diretrizes e especificações técnicas desenvolvidas para padronizar a comunicação e a conexão de dispositivos eletrônicos por meio da interface USB. Já o segundo tipo se refere a um conjunto de diretrizes técnicas desenvolvido para padronizar a interface e as características dos cabos e conectores USB Tipo-C, onde é possível extrair informações a respeito da camada física do protocolo USB 3.0, dimensões do conector, suporte a velocidades mais altas etc.

Sabe-se que o DUT foi categorizado como uma interconexão, devido a isso, é pertinente a comparação dele a um cabo USB. Logo, a documentação utilizada para verificar como as interconexões são testadas é a Especificação para Cabos e Conectores USB Tipo-C.

De acordo com essa especificação, a interconexão USB Tipo-C utiliza uma arquitetura *point-to-point*, ponto-a-ponto em português, o que significa que ela permite a conexão direta entre dois dispositivos sem a necessidade de um hub ou dispositivo intermediário. Essa arquitetura suporta vários barramentos, dependendo da versão do protocolo USB utilizado, entre eles os principais são:

- a) USB 2.0: Barramento utilizado para transferência de dados de baixa velocidade, com taxas de transferência de até 480 Mbps;
- b) USB 3.0 ou USB 3.2 Gen 1 (*SuperSpeed* USB 5 Gbps): Barramento com taxas de transferência de até 5 Gbps.
- c) USB 3.2 Gen 2 (*SuperSpeed* USB 10 Gbps): Barramento também conhecido como *SuperSpeed* USB 10 Gbps, oferecendo taxas de transferência de até 10 Gbps.
- d) USB 3.2 Gen 2x2 (*SuperSpeed* USB 20 Gbps): Barramento com taxas de transferência de até 20 Gbps.

Além dos barramentos, a interconexão USB Tipo-C suporta vários sinais para diferentes funcionalidades. Os principais sinais incluem:

- a) TX (*Transmit Data*): Utilizado para transmitir dados do dispositivo para o host.
- b) RX (*Receive Data*): Utilizado para receber dados do host para o dispositivo.
- c) VBUS (*Power*): Fornece energia para o dispositivo USB.
- d) GND (*Ground*): O sinal de referência para os outros sinais.
- e) CC (*Configuration Channel*): Responsável pela negociação da função do conector, como identificar o dispositivo e negociar as funções suportadas.
- f) SBU (*Sideband Use*): Sinais de uso especial para funcionalidades adicionais, como áudio analógico ou funcionalidades customizadas.

A Figura 13 ilustra o plano de sinal funcional abrangente para o receptáculo USB tipo C completo, nem todos os sinais mostrados são necessários em todas as plataformas ou dispositivos. Conforme mostrado, a lista de sinais do receptáculo oferece funcionalmente USB 2.0 (D+ e D-) e USB 3.2 (pares TX e RX), barramentos de dados, alimentação USB (VBUS) e terra (GND), sinais de canal de configuração (CC1 e CC2) e dois pinos de sinal de uso de banda lateral (SBU) (USB IMPLEMENTERS FORUM, 2022b).

Figura 13 – Interface do receptáculo USB tipo C.

A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10	A11	A12
GND	TX1+	TX1-	VBUS	CC1	D+	D-	SBU1	VBUS	RX2-	RX2+	GND
GND	RX1+	RX1-	VBUS	SBU2	D-	D+	CC2	VBUS	TX2-	TX2+	GND
B12	B11	B10	B9	B8	B7	B6	B5	B4	B3	B2	B1

Fonte: (USB IMPLEMENTERS FORUM, 2022b)

O DUT desta pesquisa é projetado apenas para suportar barramentos USB 3.0, ou seja, *SuperSpeed* (SS) com taxa de transferência até 5 Gbps. Quando se propõe uma validação de pré-conformidade desse dispositivo, é preciso verificar na especificação como os barramentos SS são normatizados.

Existem diversas diretrizes e particularidades apresentadas na documentação e o USB-IF classifica essas informações em informativas, opcionais e normativas. A primeira descreve informações que se pretende discutir e esclarecer requisitos e recursos em vez de obrigá-los, a segunda descreve recursos não exigidos por esta especificação, no entanto, se um recurso

opcional for implementado, o recurso deve ser implementado conforme definido pela documentação. E a última descreve os recursos exigidos pela documentação.

Para esta pesquisa, que visa uma metodologia de pré-conformidade, serão utilizadas, em geral, informações normativas referentes a tecnologia USB 3.0.

No tópico 3.7.1 do documento, é informado que impedância característica diferencial para pares diferenciais blindados é, de preferência, em  $90 \Omega \pm 5 \Omega$ , e recomenda-se que a impedância característica de terminação única de cabos coaxiais seja de  $45 \Omega \pm 3 \Omega$ . Também é mencionado que a impedância deve ser avaliada usando um tempo de subida de 200 ps (10%-90%), visto que um tempo de subida mais rápido não é necessário, pois tornará as descontinuidades do dispositivo de teste de cabo mais proeminentes.

Já no tópico 3.7.2.4 é apresentado os Requisitos de Montagem de Cabo Passivo TX/RX para USB 3.2 Gen1 (USB 3.0), onde é informado que o USB-IF utiliza de parâmetros S para obter o resultado de *Insertion loss fit at Nyquist frequencies (ILfitatNq)*. Basicamente, essa expressão se refere à perda de sinal ou energia que ocorre quando um dispositivo é inserido em um sistema de comunicação ou transmissão de dados e como essa perda é afetada em frequências de Nyquist (O teorema de Nyquist estabelece que, para recuperar corretamente um sinal amostrado, a taxa de amostragem deve ser, no mínimo, duas vezes maior que a frequência mais alta presente no sinal original). Isso é importante para garantir que o dispositivo inserido seja compatível com o sistema em termos de capacidade de transmissão de sinal e para evitar problemas de degradação ou distorção do sinal em frequências críticas.

Devido a essa informação pode-se constatar que o equipamento utilizado pelo USB-IF para fazer testes de conformidade em cabos USB tipo C é o VNA, já que ele é capaz de extrair os parâmetros S necessários.

### **3.1.4 Ferramenta de conformidade com o USB tipo C**

No Documento de Conformidade de Conectores e Conjuntos de Cabos *Universal Serial Bus Type-C* é possível obter mais informações a respeito dos equipamentos utilizados nos testes de conformidade de um cabo USB tipo C.

Esta documentação cita que é recomendada na configuração da largura de banda do VNA ser limitado o intervalo de varredura de frequência a um pouco mais alto do que o limite exigido na especificação. Por exemplo, um intervalo de varredura de 20 GHz para os pares USB tipo C *SuperSpeed* e pares TX/RX, conforme exigido pela especificação.

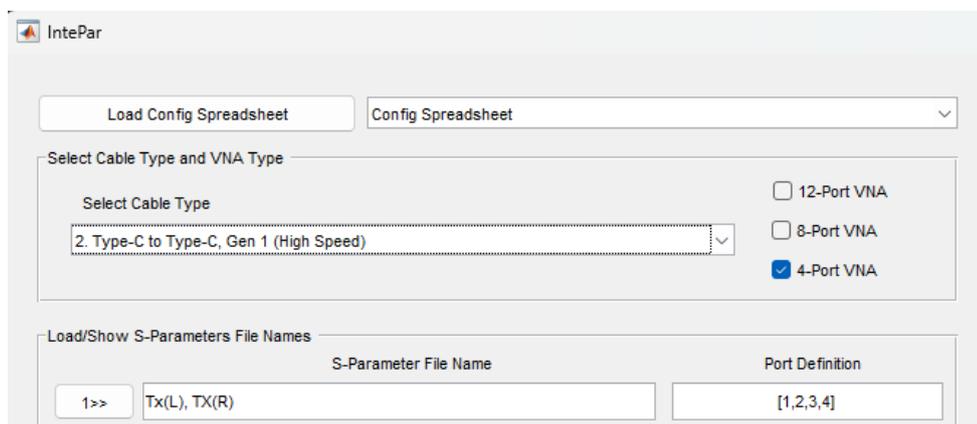
Um número suficiente de pontos também deve ser incluído na varredura de frequência, por exemplo, em incrementos de 10 MHz para pares SS e pares TX/RX (USB IMPLEMENTERS FORUM, 2022c, p.79).

Os parâmetros S coletados pelo VNA são processados por uma ferramenta de conformidade com o USB tipo C para fazer o ajuste da perda de inserção e calcular  $IL_{fitatNq}$  e outros parâmetros integrados. Esta ferramenta é encontrada no site do USB-IF no repositório documentos de conformidade USB tipo C e é denominada *IntePar*.

O *IntePar* é um script em MATLAB compilado através do MATLAB *Runtime* e serve para validar o cabo USB 3.2 utilizando os parâmetros S medidos pelo VNA. Basicamente, o usuário seleciona o tipo de VNA que está utilizando, o tipo de cabo USB que quer validar e insere as medições exigidas pelo programa de acordo com o que é mostrado na interface. Dentro de seu manual de uso, e no próprio programa executado, é possível obter mais informações sobre o padrão recomendado de VNA para coleta desses parâmetros.

Na Figura 14 é mostrado a interface do programa *IntePar* cujas opções de VNA para análise são de 4, 8 e 12 portas. Quanto menor a quantidade de portas, maior será a quantidade de medições exigidas para o cálculo dos parâmetros integrados e validação da conformidade dos cabos.

Figura 14 – Interface do programa IntePar.



Fonte: Autoria própria.

Sendo assim, constata-se que o equipamento recomendado para executar os testes de conformidade em um USB tipo C no padrão USB 3.2 Gen 1 deve ser, no mínimo, um VNA de 20GHz e 4 portas.

### 3.2 EQUIPAMENTOS DE PRÉ-CONFORMIDADE

Um VNA que atende às especificações dadas pelo USB-IF, ou seja, no mínimo 4 portas e que opere numa taxa a partir de 20GHz, varia, em média, entre U\$ 50.000,00 a U\$ 340.000,00 dólares de acordo com cotações feitas em junho de 2023. Portanto, esta subseção tem como objetivo explorar alternativas para equipamentos substitutos para análise de pré-conformidade com o padrão USB, visando melhor custo benefício nesse processo.

No intuito de identificar um VNA com a disposição de duas portas, contendo faixas de frequência de amplitude suficiente para viabilizar a comunicação de 5 Gb, encontra-se o LibreVNA de 2 portas que opera na faixa de 100 kHz até 6 GHz, apresentado na Figura 15. Este equipamento não se afigura adequado para a realização de testes de conformidade, porém, apresenta-se como uma alternativa mais economicamente acessível (na faixa de U\$ 630,00 dólares de acordo com cotação de agosto de 2023), cabendo-lhe a possibilidade de ser empregado em testes preliminares de conformidade.

Através da aplicação deste VNA de código aberto, é possível obter medições de perda de retorno do dispositivo em análise, permitindo posteriormente a conversão dos resultados para o domínio do tempo. A partir deste procedimento, seria viável a obtenção do perfil de impedância do dispositivo em análise. Contudo, é válido ressaltar que a resolução desse perfil se encontra intrinsecamente associada à largura de banda do equipamento, portanto a perda de informações relevantes para a análise de pré-conformidade deve ser considerada.

Figura 15 – Kit LibreVNA de duas portas.



Fonte: (ELESHOP, 2023).

Uma alternativa adicional em termos de equipamento poderia ser o analisador de taxa de erro de bits (BERT), o qual proporciona uma avaliação da taxa de erro de bits, tornando-se passível de emprego como uma previsão para o desempenho que será alcançado na aplicação definitiva. A sua combinação com outros dispositivos permite a obtenção ou estimativa do diagrama de olho, fornecendo assim informações críticas sobre a qualidade do sinal transmitido.

Entretanto, é importante mencionar que um analisador de taxa de erro de bits operante em uma frequência próxima do padrão USB implica em um custo considerável, estimado em aproximadamente US\$ 15.000,00 dólares (cotação julho de 2023).

Também é possível destacar o Refletômetro no Domínio do Tempo (TDR) diferencial como uma opção igualmente válida. Este aparato emerge como uma alternativa economicamente mais acessível no contexto da realização de testes preliminares de conformidade. A pertinência dessa escolha advém da sua capacidade intrínseca de fornecer o perfil de impedância do dispositivo submetido a ensaio, bem como de verificar propriedades associadas à faixa de frequência do sinal avaliado.

Destaca-se, exemplarmente, o modelo Picotest J2154A, um TDR diferencial comercializado por aproximadamente US\$ 4.000,00 dólares (cotação de agosto de 2023). A combinação desse instrumento com um osciloscópio caracterizado por especificações equivalentes àquelas delineadas pelo USB-IF pode se afigurar como suficiente para conferir uma validação preliminar a dispositivos conformes ao padrão USB 3.0.

Sob uma perspectiva de viabilidade financeira, o LibreVNA se apresenta como uma opção preeminente. No entanto, quando se considera a capacidade de resolução inerente a esse equipamento, constata-se que sua aplicação neste contexto como ferramenta analítica para testes de pré-conformidade não se mostra vantajosa. Isso se deve à exigência normativa de uma resolução mínima de 20 GHz, enquanto o LibreVNA apresenta um alcance limitado até 6 GHz.

Ademais, um fator adicional de influência reside na limitação do LibreVNA a somente duas portas, resultando em uma inaptidão para a mensuração de diversos parâmetros de substancial relevância. Por conseguinte, a alternativa mais adequada para atender às necessidades elencadas emerge na forma do Refletômetro no Domínio do Tempo (TDR) diferencial. Este último, ao contrário do LibreVNA, não se encontra restringido por tal limitação e proporciona uma representação mais precisa dos resultados obtidos em termos de impedância.

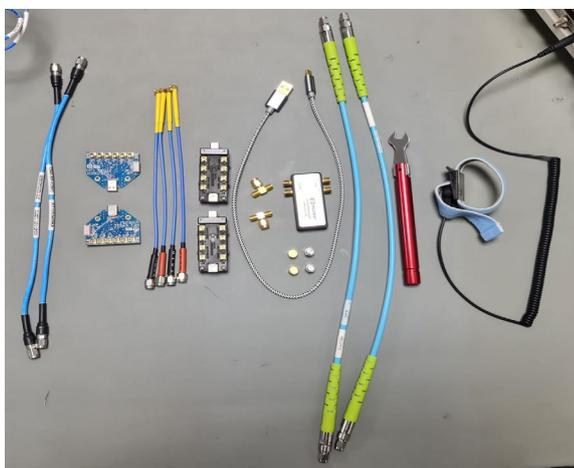
### 3.3 ENSAIOS PRELIMINARES

O estudo dos procedimentos a serem adotados nos testes de pré-conformidade, após a seleção do instrumento a ser empregado, adquire relevância. Nesta seção, tem-se o propósito de apresentar os equipamentos adicionais necessários no ambiente de testes, os acessórios requeridos, bem como os ensaios preliminares a fim de avaliar o desempenho e a adequação do TDR escolhido aos critérios de validação exigidos.

A utilização do TDR demanda a coexistência de um osciloscópio, cujo modelo empregado para este estudo foi o MSO 73304DX, fabricado pela Tektronix. Vale destacar que esse equipamento exibe largura de banda substancialmente superior ao necessário para a execução dos testes de pré-conformidade. Não obstante, essa característica permite a seleção da largura de banda apropriada para a análise dos resultados em diferentes faixas de frequência.

Acerca do teste de integridade do sinal para o conjunto de cabos USB Tipo-C, o Documento de Conformidade de Conectores e Conjuntos de Cabos *Universal Serial Bus Type-C* preconiza a utilização de dispositivos de teste aprovados pelo USB-IF, designados como *fixtures* (USB IMPLEMENTERS FORUM, 2022c, p.67). Além dos *fixtures*, torna-se imperativo contemplar as conexões entre este dispositivo de teste e o DUT. Adicionalmente, destaca-se a importância da interligação entre o osciloscópio e o TDR, que requer a adoção de cabos de conexão SMA em detrimento das tradicionais pontas de prova convencionais. A Figura 16 ilustra os acessórios identificados para a fase inicial dos ensaios, onde constam quatro cabos SMA para SMP de 18 GHz e 50 $\Omega$  de impedância, quatro cabos 2,92mm de 40 GHz, dois *fixtures* da marca ZEBAX, dois *fixtures* da marca WILDER, cargas de 0  $\Omega$  e 50 $\Omega$ , uma chave de torque, um cabo USB de alimentação e o TDR PICOTEST.

Figura 16 – Acessórios utilizados nos testes preliminares.



Fonte: Autoria própria.

### 3.3.1 Configuração do osciloscópio

O processo inicial na fase de testes preliminares envolveu a configuração do osciloscópio modelo MSO 73304DX. Inicialmente, procedeu-se à restauração dos parâmetros de fábrica do equipamento por meio da função de configuração padrão (*default setup*). Após esse procedimento, aguardou-se a estabilização térmica do mencionado instrumento, a fim de possibilitar a realização da calibração interna.

A calibração interna se constituiu no ajuste das portas dos canais do osciloscópio, em conjunto com as pontas de prova empregadas (cabos 2,92mm de 40 GHz). É válido enfatizar que esse estágio de calibração pode apresentar variações de acordo com as especificações do instrumento em utilização, devendo ser referenciado no manual de operação correspondente ao osciloscópio empregado.

A Figura 17 apresenta o resultado dos sinais de dois canais já ajustados e calibrados. Esta etapa é um procedimento fundamental para garantir a precisão e a fidelidade das medições realizadas pelo equipamento.

Figura 17 – Sinal dos canais do osciloscópio calibrados.



Fonte: Autoria própria.

### 3.3.2 Calibração do TDR

O segundo passo consiste na configuração do TDR. Nessa etapa, procedeu-se à interligação de cabos 2,92 mm de 40 GHz entre dois canais do osciloscópio e os pinos 1 e 3 do TDR diferencial, modelo PICOTEST. Ressalta-se que estes cabos possuem características de fase casada, o que possibilita a obtenção de respostas de sinal idênticas em ambos. Ademais, para alimentar o TDR via osciloscópio, empregou-se um cabo de USB Tipo C para Tipo B. Após a conclusão das conexões, efetuou-se a otimização do sinal na tela do osciloscópio para assegurar a máxima eficácia da amostragem.

De acordo com a documentação fornecida para o TDR PICOTEST, determinadas funções matemáticas básicas necessitaram ser configuradas no osciloscópio com o propósito de calcular o coeficiente de reflexão e a impedância. A Figura 18 ilustra a configuração da função matemática destinada a medições de TDR diferencial. As fórmulas para cálculo do coeficiente de reflexão e conversão deste último para impedância foram aplicadas. A fase subsequente compreendeu a calibração do TDR, que envolveu a inserção sequencial de uma carga de referência nos pinos 2 e 4, seguida pela adição de fatores de correção às fórmulas matemáticas a fim de conciliar as leituras de impedância com os valores proporcionados pela carga de referência.

Figura 18 - Configuração da função matemática para medições de TDR diferencial com o TDR J2154A.

Oscilloscope Math/Measure FCN	Math FCN EQ	Notes
Math1	$-8 \cdot Ch1 - 1$	Calculates Reflection coefficient ( $\Gamma$ ) for Trace 1
Math2	$-8 \cdot Ch2 - 1$	Calculates Reflection coefficient ( $\Gamma$ ) for Trace 2
Math3	$50 \cdot \frac{1+Math1}{1-Math1}$	Converts reflection coefficient ( $\Gamma$ ) to impedance ( $Z_{DUT}$ ) for Trace 1
Math4	$50 \cdot \frac{1+Math2}{1-Math2}$	Converts reflection coefficient ( $\Gamma$ ) to impedance ( $Z_{DUT}$ ) for Trace 2
Math5	$Z_{diff} = Math3 + Math4$	Calculates the differential impedance
Meas5	mean(Math5)	Calculates the average differential impedance

Fonte: (PICOTEST, 2022).

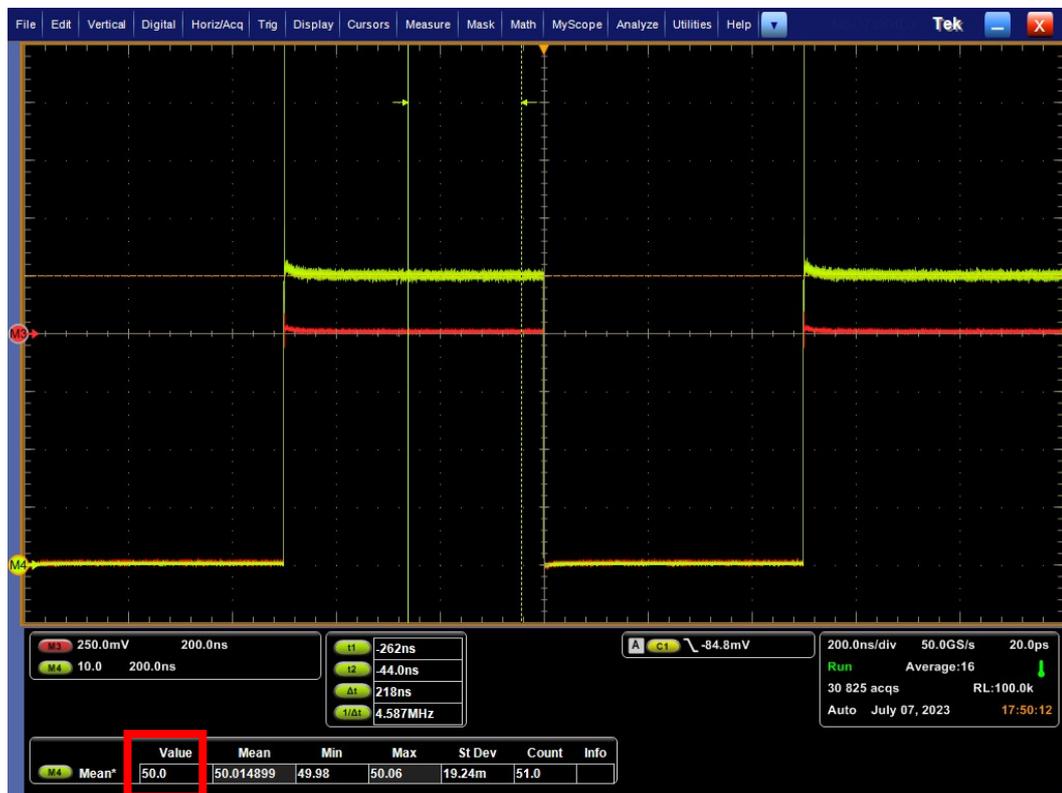
As Figuras 19 e 20 exibem os valores de impedância obtidos por meio da medição realizada pelo TDR, antes e após a implementação dos fatores de correção, respectivamente, mediante a conexão de uma carga de 50  $\Omega$ . Nota-se uma melhora de 0,75  $\Omega$  entre os valores.

Figura 19 – Medição de impedância da carga de  $50\ \Omega$  antes da calibração do TDR.



Fonte: Autoria própria.

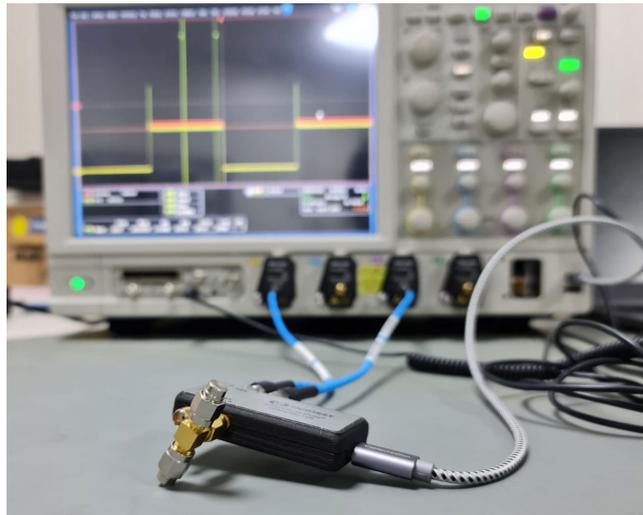
Figura 20 - Medição de impedância da carga de  $50\ \Omega$  depois da calibração do TDR.



Fonte: Autoria própria.

A Figura 21 retrata um cenário de teste empregado na calibração do TDR, envolvendo a conexão de duas cargas de  $50 \Omega$  em paralelo, resultando em uma impedância total de  $25 \Omega$ . A Figura 22 revela o desempenho obtido em termos de impedância com a realização da conexão simultânea das duas cargas de  $50 \Omega$ . Nota-se que as leituras de impedância se mantiveram em proximidade considerável com o valor nominal das cargas em série, apresentando  $25,01 \Omega$  de impedância.

Figura 21 – Medição da impedância de duas cargas de  $50 \Omega$  em paralelo.



Fonte: Autoria própria.

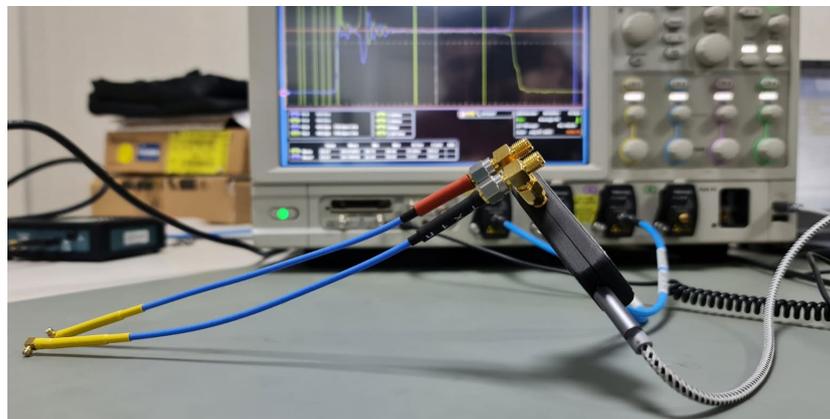
Figura 22 – Resultado da medição da impedância de duas cargas de  $50 \Omega$  em paralelo.



Fonte: Autoria própria.

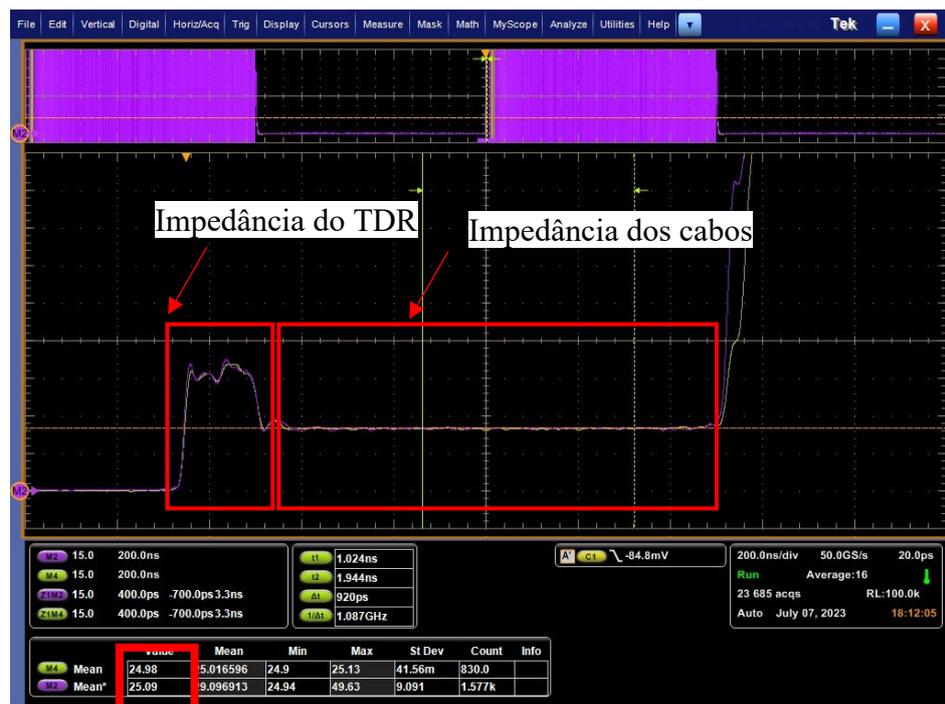
Posteriormente, com o intuito de validar a calibração realizada, efetuou-se a conexão dos cabos SMA para conector SMP (18 GHz) nos terminais 2 e 4 do TDR, que no futuro serão utilizados para a ligação com o *fixture*, conforme apresentado na Figura 23. Os cabos SMA para SMP possuem especificação de impedância aproximada de  $50 \Omega$  e, após a conexão em série ao TDR, as leituras obtidas em cada canal foram de aproximadamente  $24,98 \Omega$  e  $25,09 \Omega$  (sinais roxo e amarelo sobrepostos), como ilustrado na Figura 24, onde é possível ver a impedância do TDR e, logo após, a impedância dos cabos. Esses resultados demonstraram um grau de precisão satisfatório, validando a medição realizada após a correção das leituras.

Figura 23 – Medição dos cabos SMA para SMP.



Fonte: Autoria própria.

Figura 24 – Resultado da medição dos cabos SMA para SMP.



Fonte: Autoria própria.

### 3.3.3 Ensaaios com cabo simples

Esta etapa tem por objetivo descrever a maneira pela qual se efetua a visualização do perfil de impedância de um componente por meio dos instrumentos osciloscópio e Reflectômetro no Domínio do Tempo (TDR). Para essa finalidade, procedeu-se à conexão de um cabo de padrão SMA para SMP, de  $50\ \Omega$ , a um único canal do TDR, o qual já se encontrava acoplado ao osciloscópio, enquanto o outro extremo permaneceu não conectado, conforme ilustrado na Figura 25.

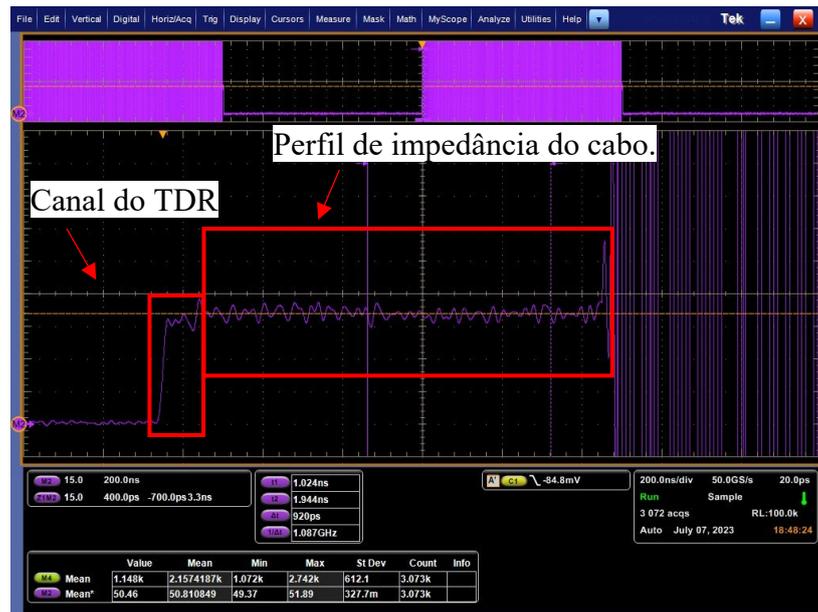
Figura 25 – Conexão de um cabo simples de  $50\ \Omega$  SMA para SMP a um canal do TDR.



Fonte: Autoria própria.

A imagem obtida no dispositivo osciloscópio é exposta na Figura 26, operando em modo de amostragem (*sample mode*), com a largura de banda do osciloscópio ajustada a 33 GHz. Inicia-se com um sinal de baixa amplitude, aproximando-se de zero, o que sugere uma impedância desprovida de relevância para a análise em questão. Posteriormente, evidencia-se a primeira alteração no sinal, consistindo em um aumento próximo a  $50\ \Omega$ , o qual corresponde à impedância do canal do TDR em si. Na sequência, em uma representação visual mais complexa, observa-se uma ligeira variação de impedância, indicando o início do cabo SMA e estendendo-se até a última transição do sinal, a qual corresponde ao conector SMP deste mesmo cabo.

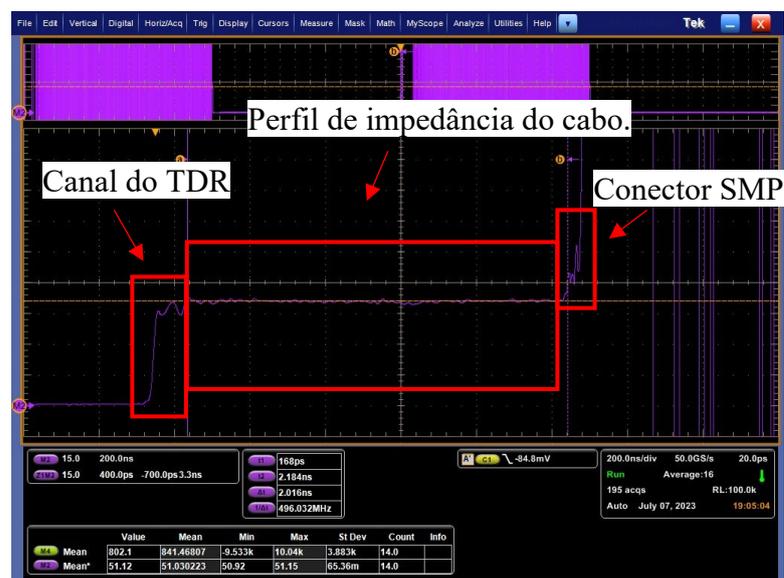
Figura 26 – Perfil de impedância de um cabo simples de 50Ω em modo de amostragem.



Fonte: Autoria própria.

Ao analisar o perfil de impedância desse mesmo cabo, sob as mesmas configurações de conexão e utilizando o mesmo canal, entretanto no modo de média do osciloscópio, onde o sinal resultante é uma média das flutuações de impedância, conforme apresentado na Figura 27, é mais fácil de visualizar a transição entre o canal do TDR e o início do cabo simples, nota-se que as variações visualizadas na Figura 26, inicialmente interpretadas como imperfeições no cabo, de fato, inexistem; trata-se, na verdade, de interferências captadas devido à ampla faixa de frequência do osciloscópio.

Figura 27 - Perfil de impedância de um cabo simples de 50Ω em modo de média.



Fonte: Autoria própria.

Dessa forma, o estudo concernente à determinação da banda ideal para se utilizar nesse equipamento assume relevância, visando a obtenção de resultados mais coerentes e verídicos em relação ao valor de impedância capturado.

### 3.3.4 Análise do *fixture*

Esta etapa engloba ensaios realizados com dois distintos tipos de *fixtures*, nomeadamente o ZEBAX e o WILDER, sendo o último o dispositivo recomendado pelo próprio USB-IF. Tais testes foram conduzidos com o propósito de avaliar a qualidade do sinal adquirido mediante as medições efetuadas por meio do TDR e do osciloscópio, e determinar qual dos referidos *fixtures* proporciona resultados mais aprimorados e se é possível utilizar *fixtures* que não foram especificados pelo padrão USB, como o ZEBAX. É imperativo enfatizar que a função inerente ao *fixture* consiste em externalizar as linhas do barramento do padrão USB para viabilizar sua análise por intermédio dos conectores SMP.

Desse modo, o primeiro *fixture* empregado foi o ZEBAX, conforme ilustrado na Figura 28.

Figura 28 – Testes preliminares com o *fixture* ZEBAX.



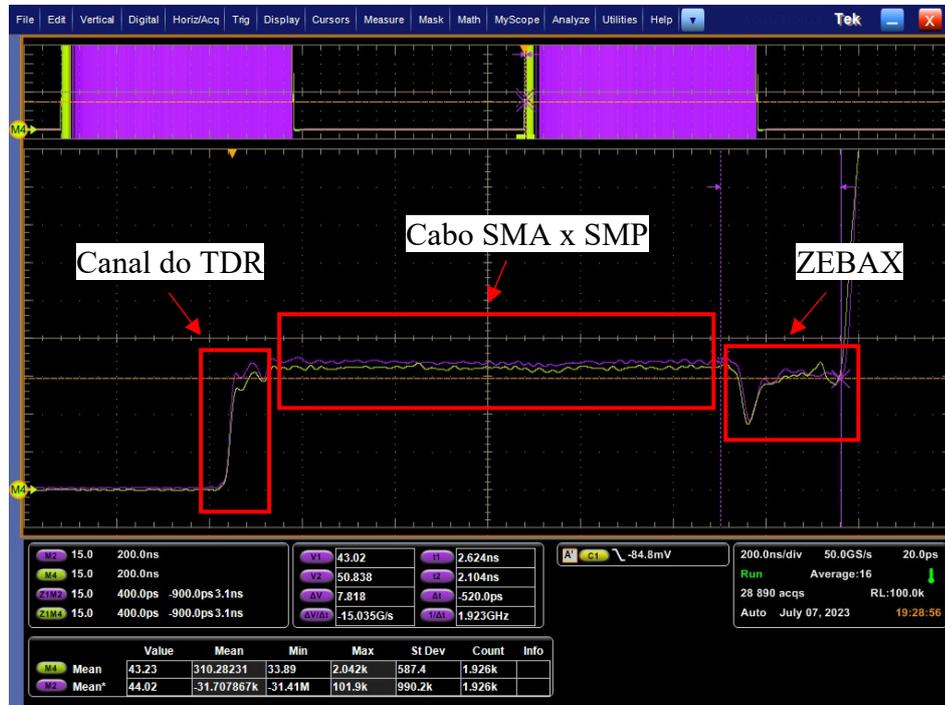
Fonte: Autoria própria.

Na Figura 29, encontra-se retratado o resultado da observação abrangente do cabo simples junto ao *fixture* ZEBAX. Tal imagem propicia a percepção da junção entre o cabo e o *fixture*, além de possibilitar a identificação de fenômenos mais notáveis, como dois declínios de impedância, um na entrada do ZEBAX e outro na saída. Tais reduções abruptas na impedância podem resultar em reflexões significativas na entrada, ocasionando a deterioração da resposta em frequência e outros desfechos pertinentes do sinal em análise.

Na Figura 30, é apresentado um enfoque detalhado no perfil de impedância do fixador ZEBAX, onde se destaca, por meio do cursor do osciloscópio, os mencionados declínios inicial e final do fixador. Observa-se que o declínio inicial está na ordem de 27  $\Omega$ . Tal constatação

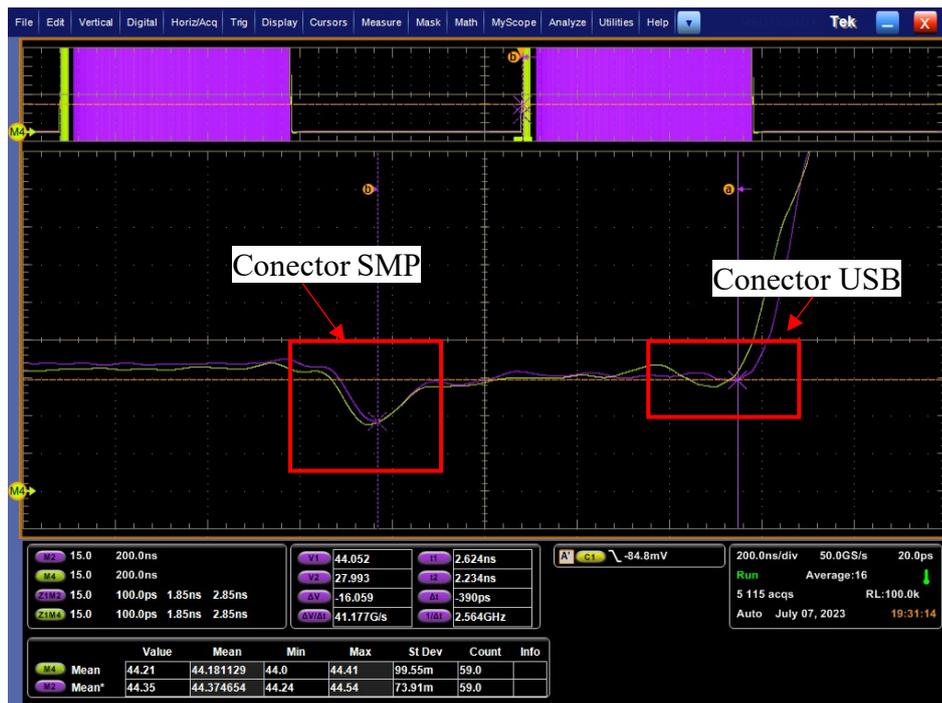
implica que a impedância do cabo coaxial de  $50\ \Omega$  experimenta uma redução para quase a metade de seu valor nominal, gerando, desse modo, reflexões de considerável magnitude em relação ao percentual do sinal objeto de medição.

Figura 29 – Perfil de impedância do sistema com o *fixture* ZEBAX.



Fonte: Autoria própria.

Figura 30 - Perfil de impedância do *fixture* ZEBAX.



Fonte: Autoria própria.

A fórmula utilizada para calcular a reflexão de impedância é dada por:

$$Z_{Ref} = \frac{Z_{final} - Z_{inicial}}{Z_{final} + Z_{inicial}}$$

Portanto, a reflexão de impedância no início do *fixture* ZEBAX é de:

$$Z_{ZEBAX_i} = \frac{50 - 27}{50 + 27} = \frac{23}{77} = 29,87\%$$

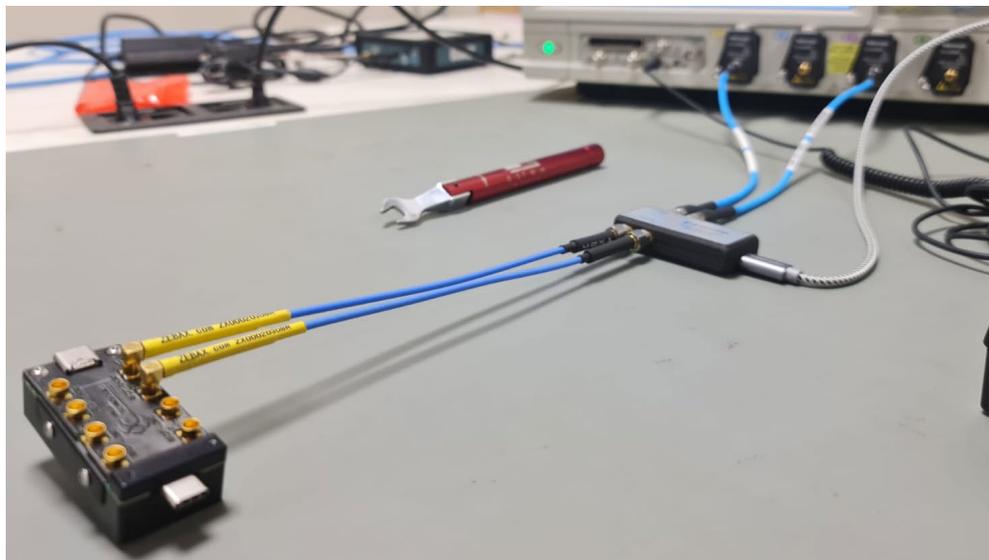
E a reflexão de impedância no final do *fixture* ZEBAX é de:

$$Z_{ZEBAX_f} = \frac{44 - 27}{44 + 27} = \frac{17}{71} = 23,94\%$$

Ou seja, essas reflexões causadas pelos afundamentos de impedância geram vários pulsos que percorrem em ambas as direções do *fixture* e que vão se estabilizando conforme o tempo de propagação. Esses pulsos não seriam relevantes se estivessem em um sistema de baixa velocidade, porém se tratando de alta velocidade, não há tempo suficiente para que ocorra a estabilização do sinal. Isso pode acarretar em interferência intersimbólica, ou seja, o bit anterior interfere no próximo bit que está sendo transmitido.

Imediatamente subsequente, procedeu-se à realização das medições empregando o *fixture* WILDER, conforme evidenciado na Figura 31.

Figura 31 - Testes preliminares com o *fixture* WILDER.

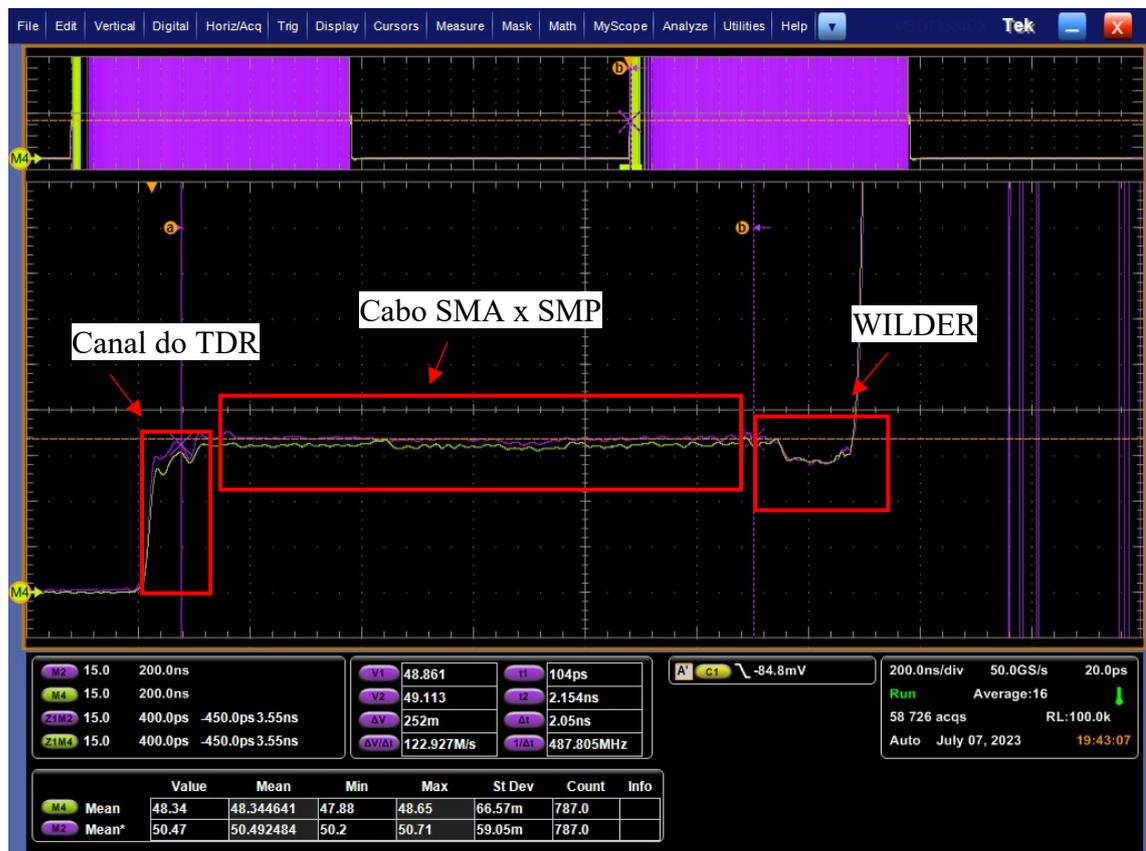


Fonte: Autoria própria.

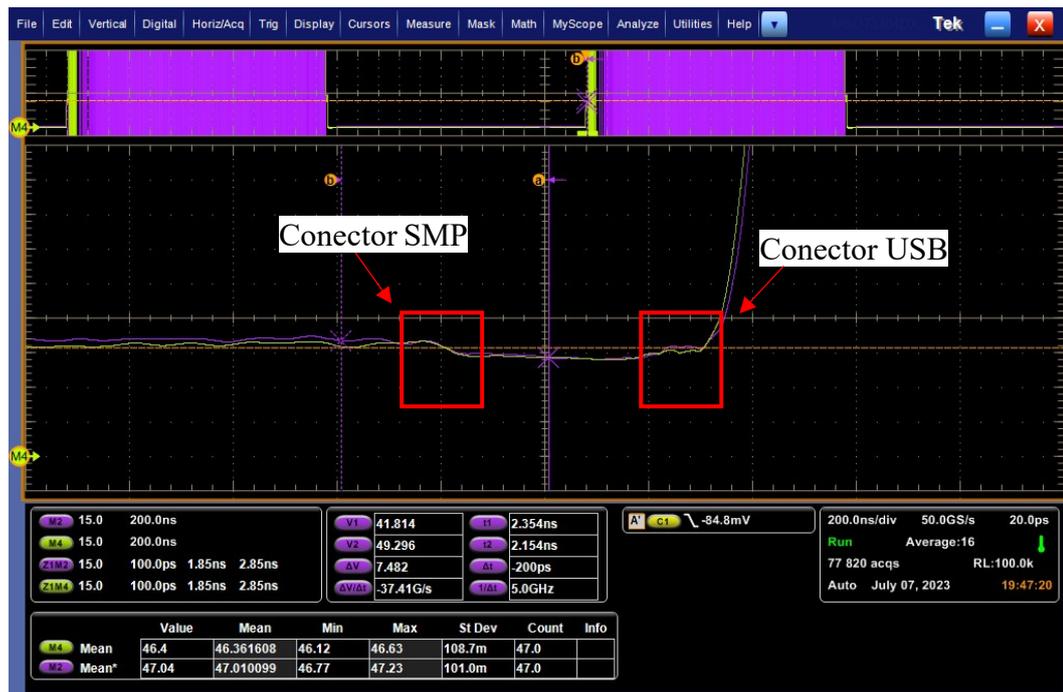
Os mesmos procedimentos adotados anteriormente foram empregados para a avaliação do perfil de impedância concernente ao *fixture* WILDER. A Figura 32 proporciona uma visão abrangente do cabo simples em conjunto com o WILDER, enquanto a Figura 33 apresenta um enfoque detalhado no perfil de impedância do mencionado *fixture*.

É possível discernir uma diferença de relevância em relação ao ZEBAX, uma vez que no WILDER ocorre uma transição de impedância de caráter notavelmente suave tanto no início quanto no término do fixador. Nesse contexto, observa-se uma redução de  $50\ \Omega$  para  $42\ \Omega$  no valor da impedância no ponto de início do fixador. Ou seja, a reflexão nesse sistema é menor que 9%, e por conta de não haver um afundamento significativo de impedância e sim uma transição suave de impedância, diminui consideravelmente a possibilidade de haver o fenômeno da interferência intersimbólica.

Figura 32 - Perfil de impedância do sistema com o *fixture* WILDER.



Fonte: Autoria própria.

Figura 33 - Perfil de impedância do *fixture* WILDER.

Fonte: Autoria própria.

Em decorrência do impacto que as flutuações na impedância exercem sobre a resposta da aresta do sinal, torna-se evidente que todas as medidas obtidas por intermédio do *fixture* ZEBAX refletirão valores distorcidos. Consequentemente, a capacidade de discernir se o dispositivo em análise opera de forma adequada ou não será comprometida, visto que a resolução já não subsistirá.

Em contrapartida, o *fixture* WILDER apresenta um padrão distinto. Sua transição de impedância ocorre de maneira suave, proporcionando assim uma observação muito mais precisa do sinal, caracterizada por maior confiabilidade. Isso, por conseguinte, assegura uma percepção substancialmente mais acurada das características do sinal em questão.

### 3.4 APLICAÇÃO DA METODOLOGIA PROPOSTA E TESTES FINAIS

A presente subseção discorre sobre a implementação da metodologia proposta de forma sequencial e detalhada.

#### 3.4.1 Caracterização normativa do dispositivo a ser testado

O procedimento inicial adotado na presente metodologia consiste na caracterização do dispositivo que será submetido a testes. Nesse contexto, procede-se à consulta da documentação relativa ao padrão USB a fim de determinar a categoria à qual o Dispositivo Sob Teste (DUT)

se classifica, tais como *USB Host*, *USB Hub Device*, *USB peripheral device* ou *USB interconnect*. Conforme já examinado na subseção 3.1, o DUT empregado no âmbito desta pesquisa é classificado como uma interconexão USB.

Posteriormente, destaca-se a importância de realizar uma estimativa da largura de banda do sinal proveniente do dispositivo objeto de análise. Tendo em vista que o DUT em questão é concebido para operar conforme as diretrizes do padrão USB 3.0, de acordo com as especificações estabelecidas pela USB Implementers Forum (USB-IF), esse padrão se caracteriza por uma taxa de transmissão de 5 Gbps e um tempo de subida (*rise time*) de 40 ps.

De acordo com Bogatin (2018, p.97), ao codificar dois bits de dados por ciclo de *clock*, a frequência subjacente do *clock* corresponderá à metade da taxa de dados, o que implica que a frequência mínima da banda de operação para atingir a taxa de 5 Gbps será de 2,5 GHz.

### 3.4.2 Estudo da viabilidade técnica do setup de testes

Uma vez estabelecida a largura de banda mínima do sinal, torna-se possível determinar os acessórios e instrumentos que serão empregados na configuração dos testes, conforme as especificações documentadas pelo USB Implementers Forum (USB-IF).

Conforme mencionado previamente, a norma estipula a utilização de um Analisador de Rede Vetorial (VNA) com no mínimo quatro portas para conduzir os testes de conformidade. Entretanto, nesta instância, optou-se por substituir tal requisito empregando um TDR diferencial, conjuntamente com um osciloscópio. Ainda assim, no contexto da realização das medições do dispositivo em análise, torna-se imperativo assegurar uma resolução adequada para permitir a observação clara do sinal e facilitar as análises subsequentes. Logo, o tempo de subida do TDR selecionado deve ser aproximado ao tempo de subida estabelecido pelo padrão USB 3.0.

A determinação dos equipamentos TDR e osciloscópio a serem empregados neste cenário de testes requer uma avaliação abrangente de todas as interconexões que serão estabelecidas ao longo do processo. Isso abarca a interface de conexão do *fixture* conforme estabelecido pela norma, em conjunto com o TDR. Entre os *fixtures* disponíveis no mercado, tem-se que cabo padrão de conexão entre o *fixture* e o dispositivo corresponde ao cabo SMA para SMP. É relevante observar que a configuração padrão de largura de banda para esse tipo de cabo é estabelecida em 18 GHz.

A partir dessa análise, torna-se possível efetuar o cálculo do tempo de subida inerente a esse gênero de cabo, utilizando a relação  $RT=0,35/BW$ , onde RT denota o tempo de subida e

BW representa a largura de banda de frequência. Esta relação é apresentada por Resso e Bogatin (2009, p. 112) como uma aproximação viável do tempo de subida de um sinal. A partir deste cálculo, obtém-se o valor aproximado de 19,44 ps para o tempo de subida do referido cabo.

O tempo de subida total de um sistema pode ser definindo pela seguinte fórmula:

$$RT_{total} = \sqrt{RT_1^2 + RT_2^2 + \dots + RT_n^2}$$

Onde,  $RT_1$  a  $RT_n$  são os tempos de subida dos elementos presentes no sistema. A fim de verificar qual o tempo de subida ideal para um TDR conseguir ter uma percepção próxima do tempo de subida do USB 3.0, foi calculado:

$$\begin{aligned} 40 \cdot 10^{-12} &= \sqrt{RT_1^2 + (19,44 \cdot 10^{-12})^2} \\ (40 \cdot 10^{-12})^2 &= RT_1^2 + (19,44 \cdot 10^{-12})^2 \\ RT_1^2 &= \sqrt{(40 \cdot 10^{-12})^2 - (19,44 \cdot 10^{-12})^2} \\ RT_1 &= 34,95 \cdot 10^{-12} = RT_{TDR} \end{aligned}$$

Portanto, o tempo de subida do TDR diferencial escolhido deve ser próximo a 35 ps. O TDR diferencial PICTEST escolhido atende este critério, pois em suas documentações consta que seu tempo de subida é de 33 ps.

Além disso, é imprescindível incorporar no sistema o tempo de subida referente à interconexão entre o TDR e o osciloscópio. Observa-se que a interface que estabelece a conexão entre esses dois dispositivos é constituída por um cabo 2,92mm, o qual, de acordo com as especificações padrão de mercado, possui uma configuração que contempla uma largura de banda aproximada de 40 GHz.

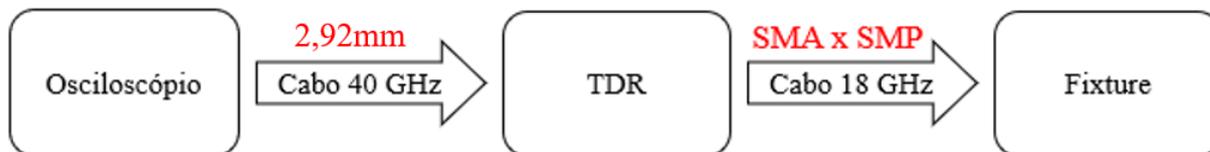
Por meio da aplicação dos mesmos critérios mencionados anteriormente, é possível derivar o valor do tempo de subida desse cabo, resultando em aproximadamente 8,75 ps. Com base nessas considerações, é viável realizar uma estimativa para a largura de banda mínima requerida do osciloscópio a ser empregado nos testes, mediante a inserção dos valores de tempo de subida obtidos na fórmula previamente mencionada.

$$\begin{aligned} RT_{osc} &= \sqrt{RT_{total}^2 - RT_{TDR}^2 - RT_{cabo}^2} \\ RT_{osc} &= \sqrt{(40 \cdot 10^{-12})^2 - (33 \cdot 10^{-12})^2 - (8,75 \cdot 10^{-12})^2} \\ RT_{osc} &= 20,84 \cdot 10^{-12} \end{aligned}$$

Aplicando este valor à relação aproximação do tempo de subida de um sinal  $RT = 0,35/BW$ , pode-se obter que a banda mínima de frequência que o osciloscópio deve possuir é de aproximadamente 16,8 GHz.

A Figura 34 ilustra um diagrama simplificado do arranjo experimental empregado para a investigação da viabilidade técnica.

Figura 34 – Diagrama simplificado do setup de testes para análise de viabilidade técnica.



Fonte: Autoria própria.

### 3.4.3 Estudo de viabilidade econômica do setup de testes

Após a determinação dos instrumentos a serem empregados nos ensaios de preliminares de conformidade, é pertinente realizar uma análise de viabilidade econômica do sistema experimental. Esse estudo tem por finalidade avaliar a economia associada à adoção dos equipamentos selecionados em substituição aos instrumentos convencionais utilizados nos testes de conformidade.

Para esse fim, realizou-se uma avaliação considerando que, tanto no cenário de teste de conformidade quanto no de pré-conformidade, é imperativo empregar o *fixture* recomendado pelo USB-IF e os cabos de conexão correlatos. Assim sendo, o procedimento de comparação de custos foi conduzido mediante a análise comparativa do conjunto composto pelo Reflectômetro no Domínio do Tempo, osciloscópio e cabos de fase casada 2,92mm, em substituição ao Analisador de Rede Vetorial (VNA) com quatro portas e largura de banda de 20 GHz.

A Tabela 1 apresenta as faixas de preço em dólares de cada componente levantado, tanto para o cenário de testes de conformidade quanto para o de pré-conformidade.

Tabela 1 – Faixa de preços dos componentes dos setups de testes.

Componente	Faixa de preço (US)
VNA 4 portas 20 GHz	A partir de 50.000,00
TDR PICOTEST	A partir de 4.000,00
Osciloscópio 15 GHz	A partir de 32.500,00
2 cabos de fase casada 2,92mm 40 GHz	A partir de 330,00

Fonte: Autoria própria.

Diante disso, a agregação dos custos associados aos equipamentos selecionados para a substituição do Analisador de Rede Vetorial, conforme preconizado pela regulamentação do

padrão USB, resultou em um montante aproximado de 36.830,00 dólares, representando uma economia de pouco mais de 13.000,00 dólares em comparação com a utilização do VNA. Tal cenário evidencia que os dispêndios associados ao arranjo experimental destinado aos testes de pré-conformidade se mostram mais vantajosos em mais de 26% quando comparados aos custos inerentes ao conjunto empregado nos testes de conformidade.

#### **3.4.4 Escolha do dispositivo de comparação**

A existência de um referencial comparativo ao avaliar os resultados provenientes das medições do Dispositivo Sob Teste (DUT) assume um caráter de extrema importância. Conseqüentemente, a seleção de um dispositivo de natureza, funcionalidade e configuração idênticos ou semelhantes ao DUT se apresenta como um requisito essencial.

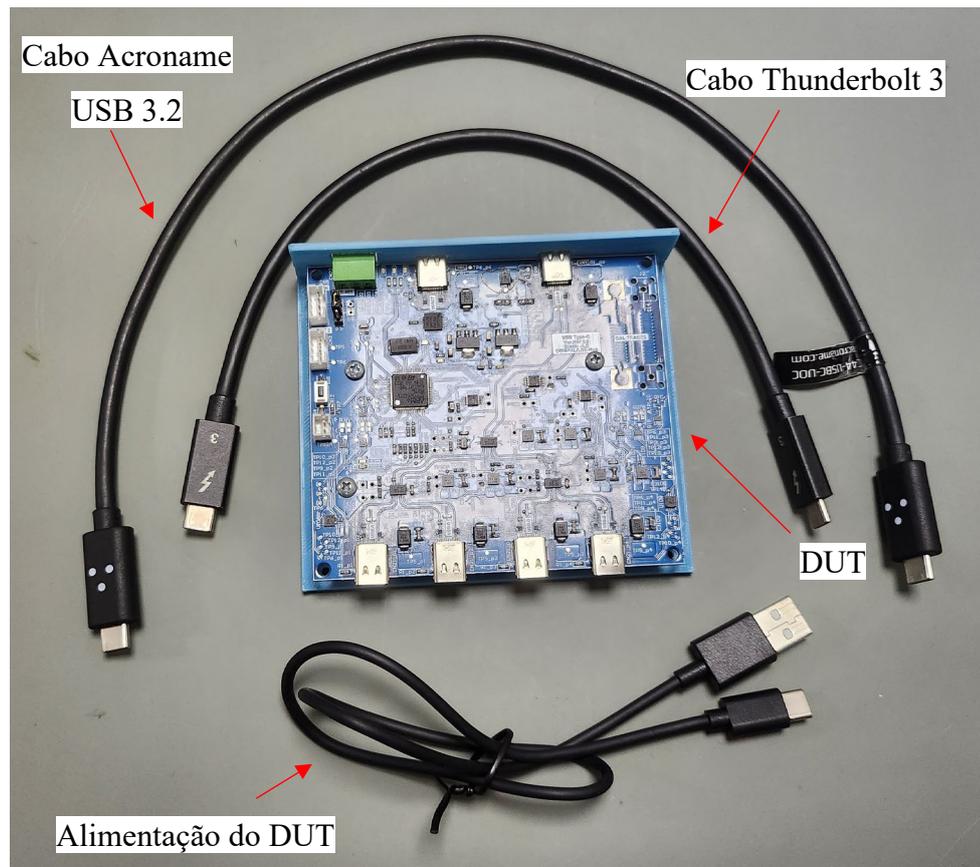
No contexto desta pesquisa, o DUT exibe características correspondentes a um cabo USB no padrão 3.0. Portanto, foi eleito como dispositivo comparativo um cabo USB 3.2 Gen 2. Embora pertencente a um padrão mais avançado, o cabo USB 3.2 Gen 2 compartilha características similares com o USB 3.0. Além disso, devido à sua taxa de transmissão substancialmente superior (10 Gbps), a resposta de sinal desse dispositivo tende a exercer uma interferência menos significativa nas medições realizadas.

#### **3.4.5 Realização dos testes**

A presente etapa trata da realização dos testes de pré-conformidade com base nos dispositivos levantados na etapa anterior. O cenário de testes englobou a utilização do osciloscópio modelo MSO 73304DX, do TDR diferencial J2154A da marca Picotest, bem como de dois *fixtures* da marca WILDER. Adicionalmente, foram empregados dois cabos de conexão do tipo 2,92mm para ligação do osciloscópio ao TDR, dois cabos SMA para SMP destinados à interconexão do suporte de teste com o TDR, dois cabos USB tipo C para tipo B para suprimento de energia ao TDR e ao DUT, e ainda dois cabos USB tipo C com taxa de dados a partir de 20Gbps.

A imagem representada na figura 35 exibe o Dispositivo sob teste (DUT) empregado, em conjunto com os cabos Thunderbolt 3, além de um cabo da marca Acroname de padrão USB 3.2, caracterizado por sua taxa de transferência de dados superior a 10Gbps.

Figura 35 – Acessórios utilizados nos testes finais.

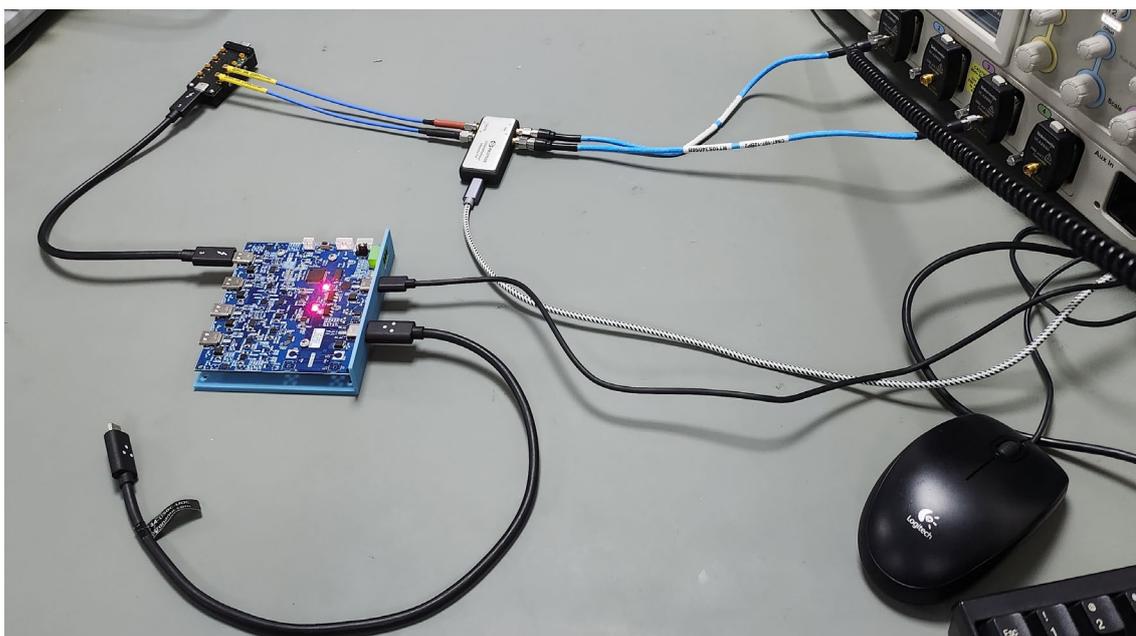


Fonte: Autoria própria.

O primeiro ensaio conduzido visou a averiguação do perfil de impedância do DUT. Nesse sentido, procedeu-se à conexão do osciloscópio ao TDR por meio dos dois cabos 2,92mm previamente selecionados. Adicionalmente, o TDR foi interligado ao suporte de teste WILDER mediante a utilização de dois cabos SMA para SMP, enquanto o DUT foi acoplado ao suporte de teste WILDER por intermédio do cabo Thunderbolt 3, através da porta A provida de conector USB tipo C. Importa mencionar a conexão do cabo USB 3.2 à entrada de sinal do DUT simulando um extensor desse canal, conforme representado na Figura 36.

No âmbito deste ensaio, foram realizadas coletas de dados com o TDR operando em modo diferencial, caracterizado pela configuração dos canais do osciloscópio para soma dos resultados de um canal com outro. Anteriormente, nos testes preliminares, as equações para cálculo dos coeficientes de reflexão e impedância do TDR eram aplicadas a canais individuais, com apresentação visual correspondente. Nos testes finais, a apresentação visual foi adaptada para coleta da impedância diferencial do dispositivo.

Figura 36 – Setup de testes do perfil de impedância do DUT.



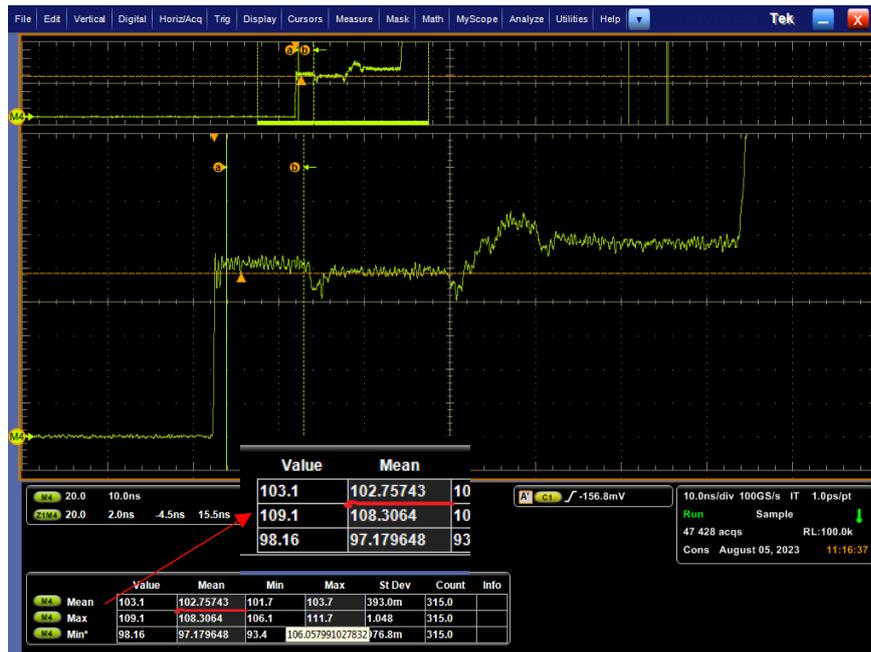
Fonte: Autoria própria.

Tal apresentação visual reveste-se de relevância, pois é possível que a impedância em relação ao terminal terra varie de um canal ao outro no percurso do sinal, sendo necessária a visualização em modo diferencial para captura desse comportamento. Cabe salientar que a escolha *fixture* recaiu sobre o modelo WILDER, não apenas em virtude de sua recomendação pelo USB-IF, mas também devido ao seu desempenho superior em relação ao *fixture* ZEBAX. Não obstante, vale considerar a exploração de *fixtures* alternativos de custo reduzido como um passo subsequente no escopo desta metodologia.

No que tange ao ensaio de perfil de impedância do DUT, é viável mensurar a impedância em intervalos específicos do sinal mediante a utilização da funcionalidade de cursores do osciloscópio. As amostras obtidas foram registradas com o osciloscópio simulando operação com banda de 15 GHz.

Na Figura 37, é apresentado o perfil de impedância geral do sistema, com os cursores posicionados no intervalo correspondente ao cabo SMA para SMP de 18 GHz que efetua a ligação entre o TDR e *fixture* WILDER. A impedância diferencial obtida neste trecho aproximou-se de  $103 \Omega$ , valor próximo ao esperado, uma vez que o cabo possui valor nominal de  $50 \Omega$ , sendo utilizados dois cabos, totalizando  $100 \Omega$ .

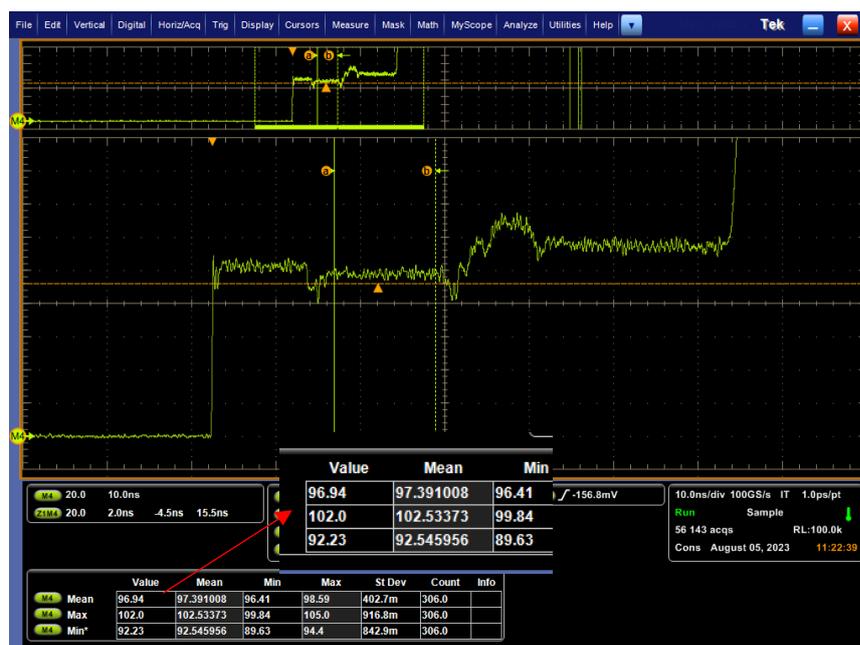
Figura 37 – Impedância do cabo SMA para SMP.



Fonte: Autoria própria.

Na Figura 38, os cursores são posicionados para capturar a impedância diferencial do cabo Thunderbolt 3. Observa-se que anteriormente a esse trecho ocorre uma leve queda na impedância, indicando a região correspondente ao suporte de teste WILDER. O cabo Thunderbolt 3 possui impedância nominal de aproximadamente  $90 \Omega$ , enquanto o valor medido pelo TDR é de cerca de  $97 \Omega$ .

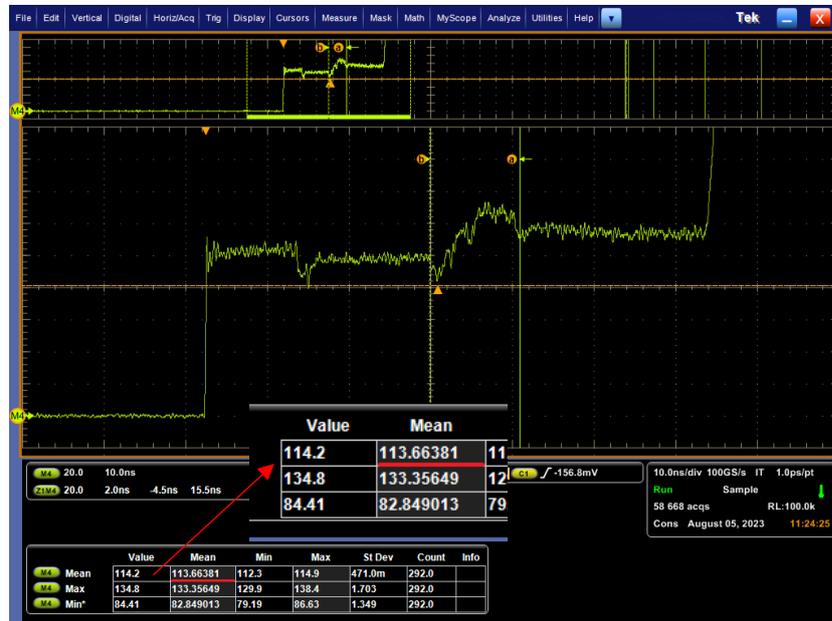
Figura 38 - Impedância do cabo Thunderbolt 3.



Fonte: Autoria própria.

A Figura 39 exibe a impedância média do DUT, situando-se em torno de  $113 \Omega$ , com valor mínimo de  $82,84 \Omega$  e pico máximo de  $133,35 \Omega$ .

Figura 39 - Impedância do DUT.



Fonte: Autoria própria.

Por fim, na Figura 40, é apresentado o perfil de impedância do cabo USB 3.2 conectado ao DUT. Esse cabo tem a finalidade de avaliar a impedância após atravessar o DUT, funcionando como uma extensão desse canal. A impedância medida nesse cabo situa-se em aproximadamente  $115 \Omega$ , em contraste com seu valor nominal de aproximadamente  $90 \Omega$ .

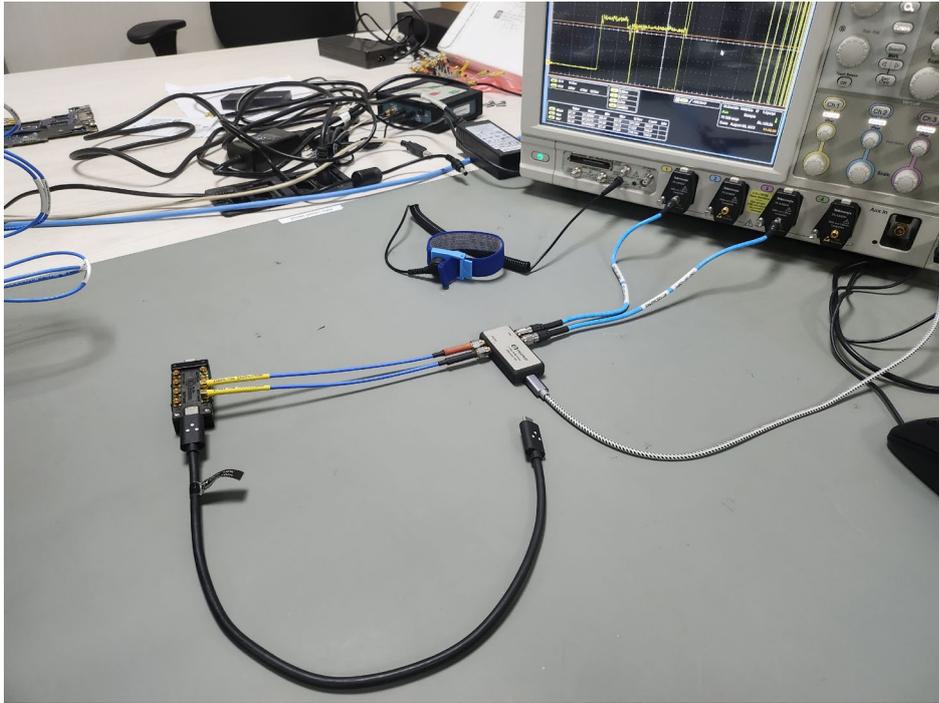
Figura 40 - Impedância do cabo USB 3.2.



Fonte: Autoria própria.

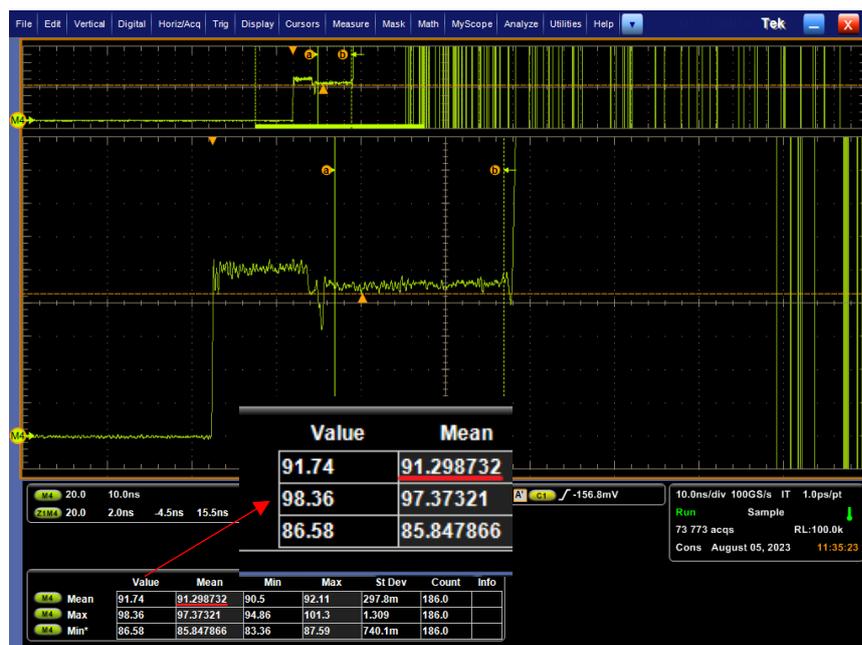
A Figura 41 retrata o ensaio de medição da impedância exclusivamente desse cabo, selecionado como o dispositivo equivalente ao DUT. Ele foi conectado diretamente ao suporte de teste WILDER, sem conexão ao DUT, resultando em um valor de impedância de  $91,29 \Omega$ , conforme ilustrado na Figura 42.

Figura 41 - Setup de testes do perfil de impedância do dispositivo equivalente.



Fonte: Autoria própria.

Figura 42 – Impedância do dispositivo equivalente.



Fonte: Autoria própria.

O segundo procedimento realizado nos ensaios finais consiste na medição do tempo de subida do DUT.

Para esse propósito, foram conduzidas duas medições distintas para fins comparativos. O primeiro ensaio envolveu a utilização de dois conectores que simulam um curto USB tipo C com terminais macho e um conector USB tipo C que simula um curto com terminais fêmea, conforme representados na Figura 43.

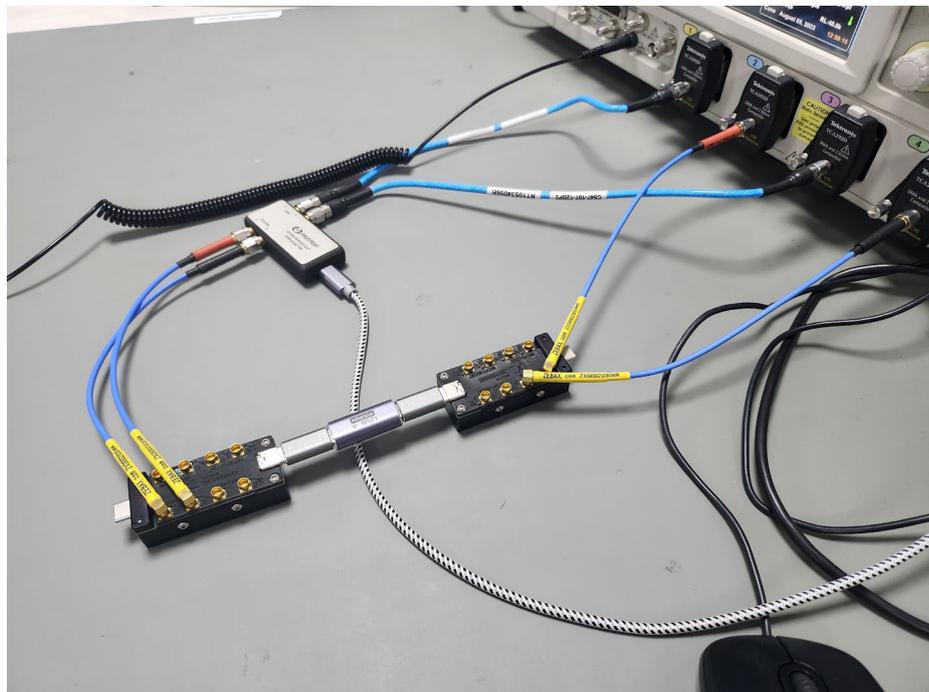
Figura 43 – Conectores USB tipo C.



Fonte: Autoria própria.

Esses conectores foram conectados a dois *fixtures* WILDER, sendo um dos *fixtures* ligado ao TDR e o outro diretamente ao osciloscópio, conforme ilustrado na Figura 44. O objetivo dessa configuração foi estabelecer um arranjo que minimizasse as perdas de frequência, visando a obtenção de uma medição mais precisa.

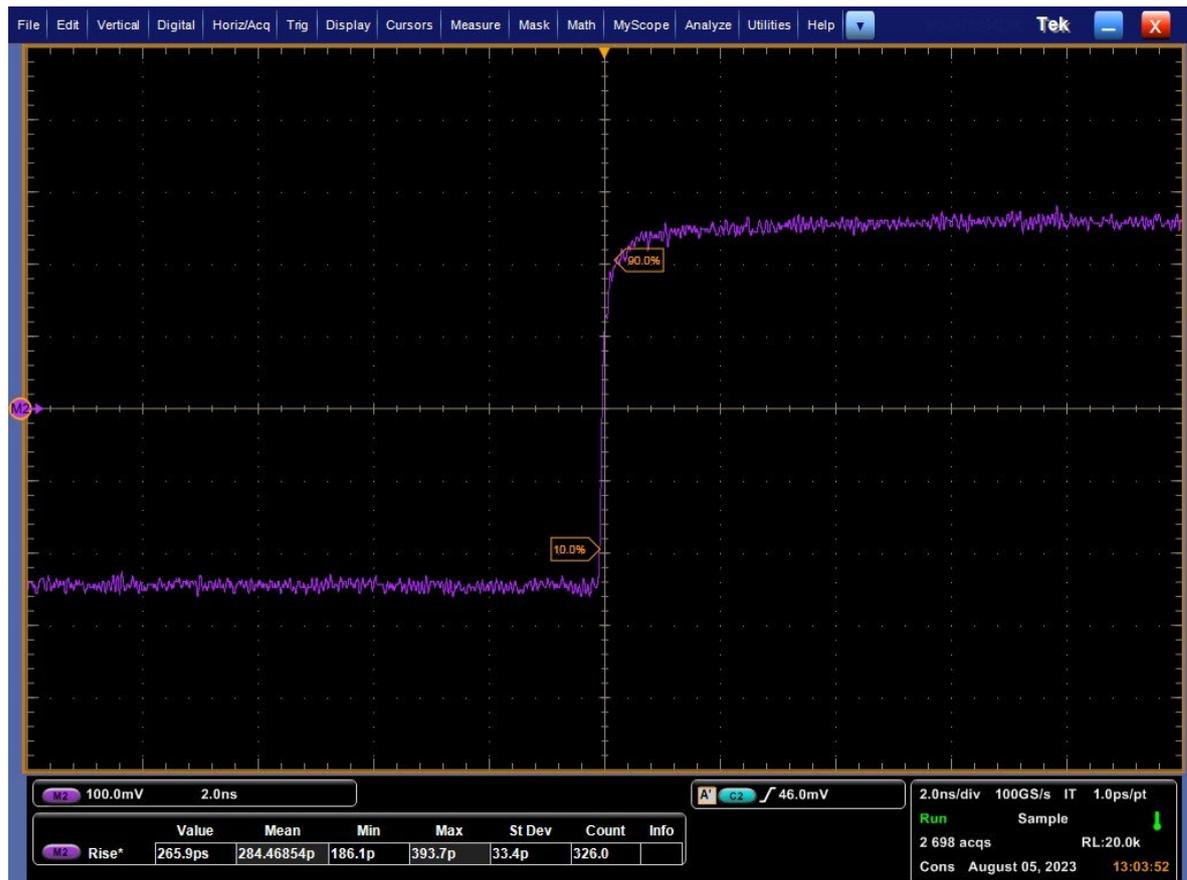
Figura 44 – Setup de testes do *rise time* do sistema sem o DUT.



Fonte: Autoria própria.

A Figura 45 apresenta o tempo de subida obtido desse arranjo com a visualização no padrão de tempo de subida 10-90, que significa o tempo que leva para o sinal passar de 10% do estado final para 90% do estado final (BOGATIN, 2018, p. 93). Esta forma de visualização é comumente usada para se ler um sinal corretamente. Observa-se que o *rise time* obtido nesta medição foi de aproximadamente 284 ps.

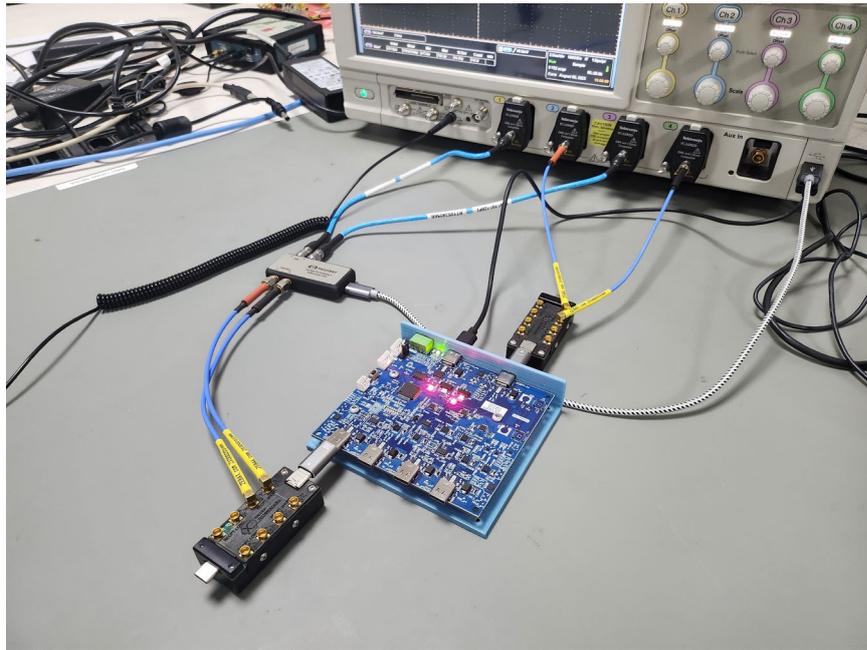
Figura 45 – Medição do *rise time* do sistema sem DUT no padrão 10-90.



Fonte: Autoria própria.

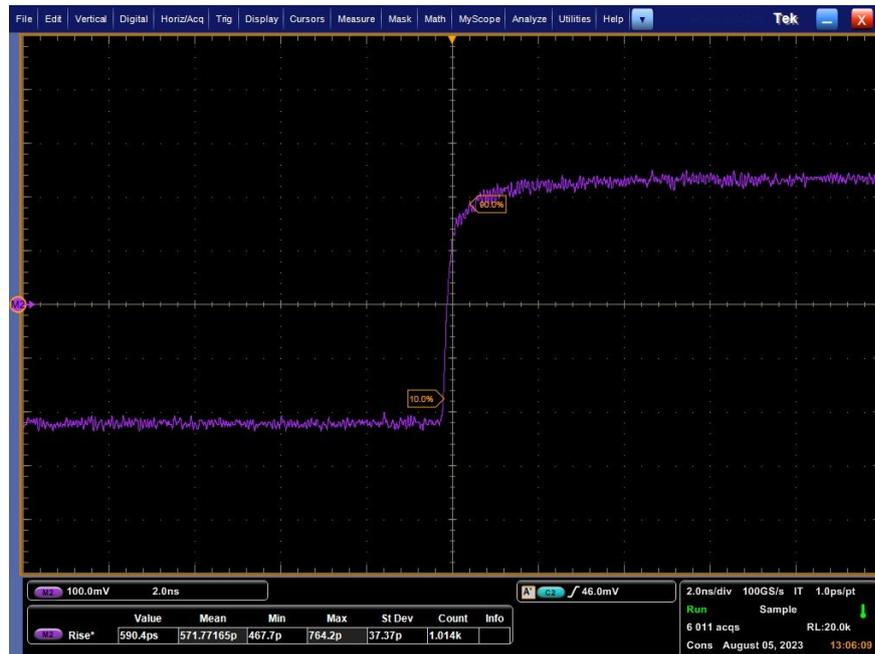
A segunda medição feita foi substituir os curtos USB tipo C pelo DUT com o objetivo de verificar o *rise time* do DUT. A Figura 46 apresenta o cenário de teste desta medição. Observa-se na Figura 47 que o tempo de subida obtido, no padrão 10-90, foi de aproximadamente 571 ps.

Figura 46 – Setup de testes do *rise time* do sistema com o DUT.



Fonte: Autoria própria.

Figura 47 – Medição do *rise time* do sistema com DUT no padrão 10-90.



Fonte: Autoria própria.

Em virtude da natureza refletiva do DUT, ocorre uma distorção no sinal durante a análise do tempo de subida no padrão 10-90. Diante desse cenário, optou-se por conduzir novas medições utilizando o padrão 20-80, no qual se focaliza a porção central do sinal, minimizando os efeitos das reflexões e proporcionando uma avaliação mais precisa da largura de banda real do dispositivo.

A Figura 48 apresenta o tempo de subida do sistema sem o DUT, empregando o padrão 20-80, resultando em uma medição de 141,9 ps. Por sua vez, a Figura 49 exibe o tempo de subida do sistema com o DUT, também utilizando o padrão 20-80, sendo a medição obtida igual a 226,2 ps.

Figura 48 - Medição do *rise time* do sistema sem DUT no padrão 20-80.



Fonte: Autoria própria.

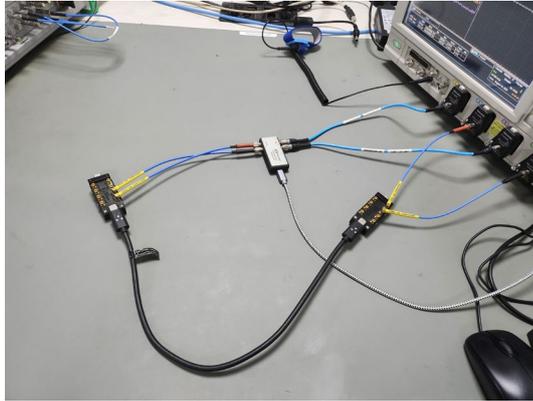
Figura 49 - Medição do *rise time* do sistema com DUT no padrão 20-80.



Fonte: Autoria própria.

O terceiro procedimento realizado nos ensaios finais foi a medição do *rise time* do dispositivo equivalente, isto é, do cabo USB 3.2 de impedância de  $90 \Omega$ . O cenário experimental empregado para efetuar esta medição é ilustrado na Figura 50.

Figura 50 – Setup de teste para medição do *rise time* do dispositivo equivalente.



Fonte: Autoria própria.

A Figura 51 retrata a resposta obtida para o tempo de subida quando o dispositivo equivalente está conectado ao sistema, seguindo o padrão de visualização 20-80. Nesse caso, o resultado obtido corresponde a 149,6 ps.

Figura 51 - Medição do *rise time* do dispositivo equivalente no padrão 20-80.



Fonte: Autoria própria.

Finalmente, em derradeiro procedimento, procederam-se à realização de coletas do perfil de impedância do Dispositivo sob Teste, tendo o osciloscópio sido ajustado para operar em distintas faixas de frequência.

As Figuras 52 a 63 apresentam os resultados da impedância do DUT, evidenciando a variação da banda de frequência do osciloscópio, abrangendo desde 500 MHz até 33 GHz.

Figura 52 – Perfil de impedância do DUT com osciloscópio de 500 MHz.



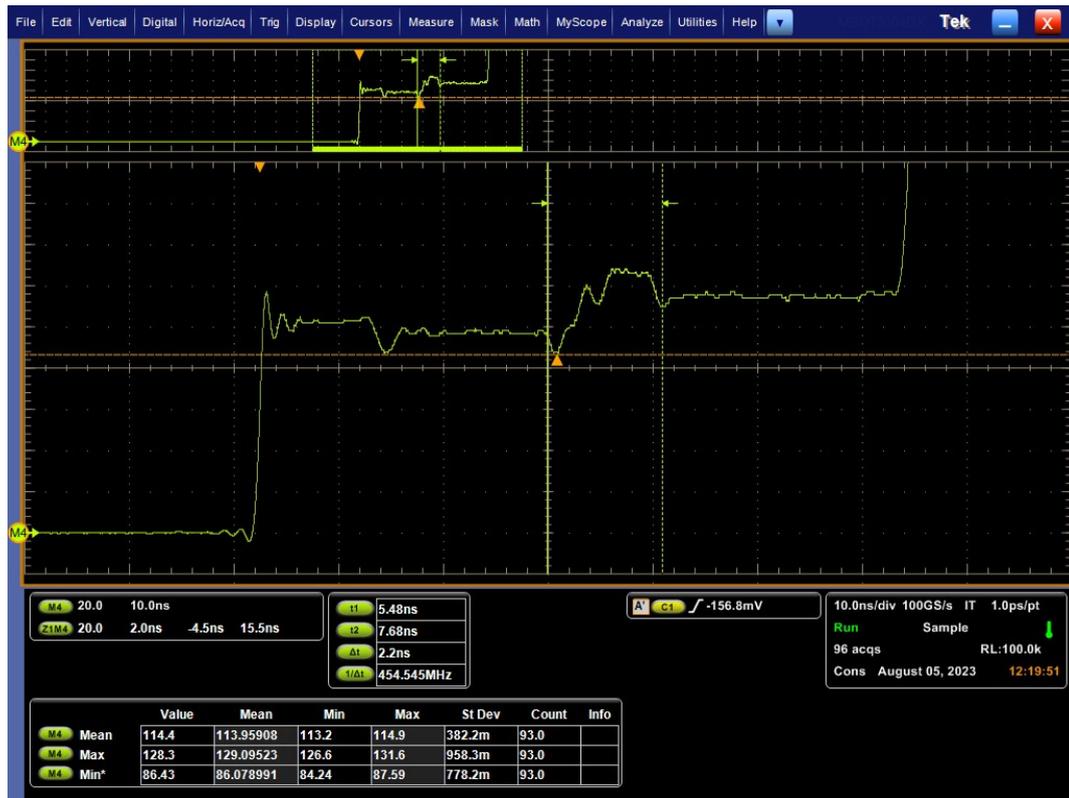
Fonte: Autoria própria.

Figura 53 - Perfil de impedância do DUT com osciloscópio de 1 GHz.



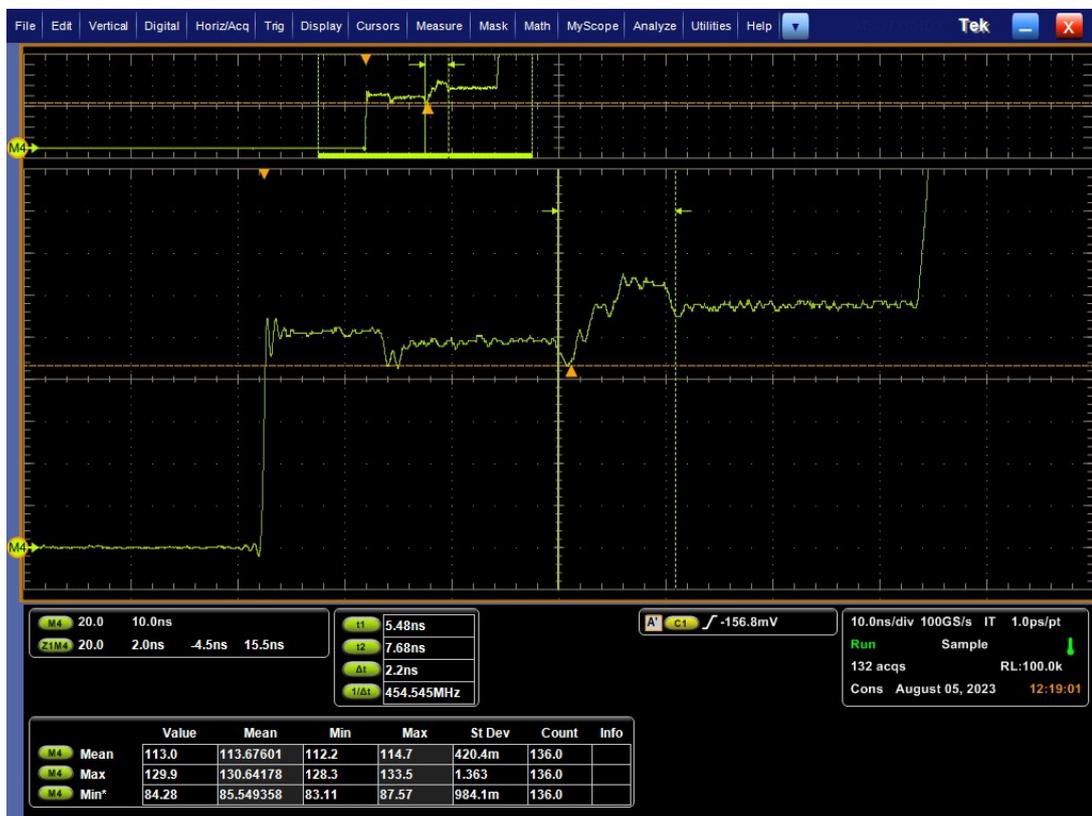
Fonte: Autoria própria.

Figura 54 - Perfil de impedância do DUT com osciloscópio de 3 GHz.



Fonte: Autoria própria.

Figura 55 - Perfil de impedância do DUT com osciloscópio de 6 GHz.



Fonte: Autoria própria.

Figura 56 - Perfil de impedância do DUT com osciloscópio de 9 GHz.



Fonte: Autoria própria.

Figura 57 - Perfil de impedância do DUT com osciloscópio de 12 GHz.



Fonte: Autoria própria.

Figura 58 - Perfil de impedância do DUT com osciloscópio de 18 GHz.



Fonte: Autoria própria.

Figura 59 - Perfil de impedância do DUT com osciloscópio de 21 GHz.



Fonte: Autoria própria.

Figura 60 - Perfil de impedância do DUT com osciloscópio de 24 GHz.



Fonte: Autoria própria.

Figura 61 - Perfil de impedância do DUT com osciloscópio de 27 GHz.



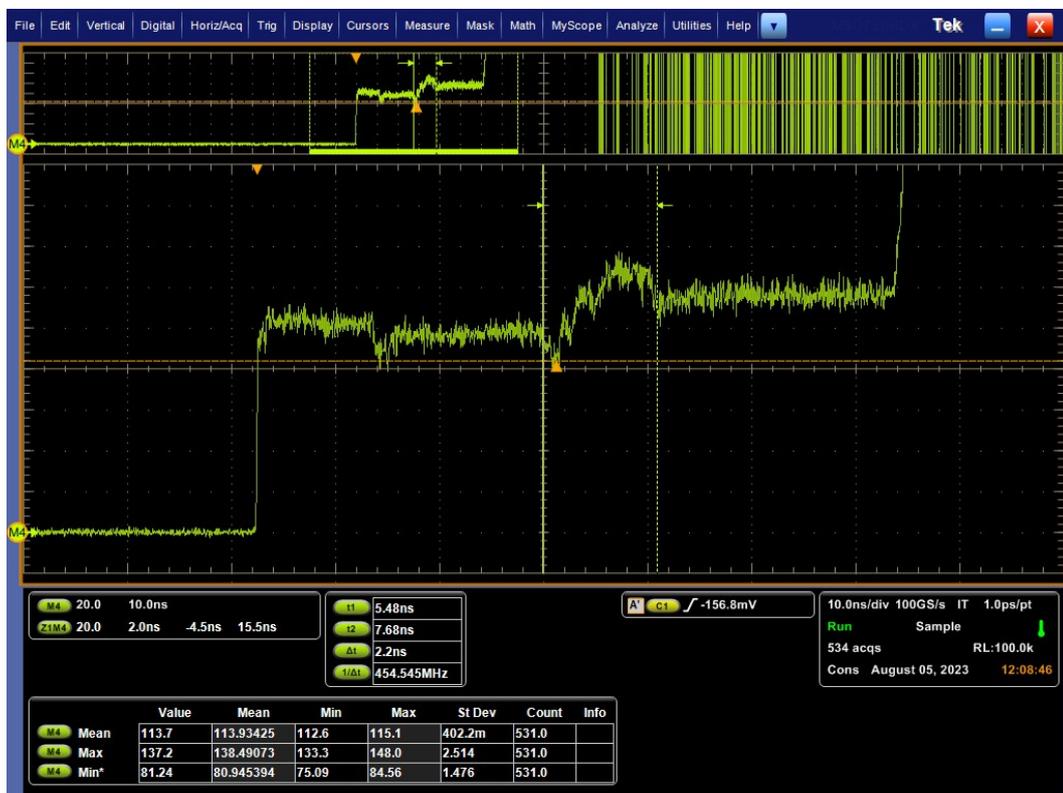
Fonte: Autoria própria.

Figura 62 - Perfil de impedância do DUT com osciloscópio de 30 GHz.



Fonte: Autoria própria.

Figura 63 - Perfil de impedância do DUT com osciloscópio de 33 GHz.



Fonte: Autoria própria.

## 4 ANÁLISE DOS RESULTADOS

A presente seção expõe a análise dos resultados alcançados a partir da realização de todos os ensaios conduzidos no decorrer da implementação da metodologia proposta no escopo deste estudo.

### 4.1 PERFIL DE IMPEDÂNCIA

A primeira análise realizada consistiu na comparação dos resultados das medições de impedância do DUT, do dispositivo equivalente e do cabo acoplado ao DUT, o qual emulou a extensão do canal do DUT, em relação aos respectivos valores nominais. Os registros das medições obtidas para os mencionados componentes, bem como seus valores teóricos correspondentes, encontram-se demonstrados na Tabela 2.

Tabela 2 – Perfis de impedância medidos e valores nominais.

<b>Componente</b>	<b>Impedância medida</b>	<b>Impedância nominal</b>
DUT	113,66 $\Omega$	-
Extensão do DUT	114,8 $\Omega$	110 $\Omega$
Dispositivo Equivalente	91,29 $\Omega$	90 $\Omega$

Fonte: Autoria própria.

A discrepância significativa entre as impedâncias nominais e medidas decorre dos componentes presentes no DUT. Este dispositivo incorpora duas chaves (chips multiplexadores) que influenciam o percurso do sinal, e cada uma dessas chaves apresenta uma impedância de 5  $\Omega$ . Na visualização em modo diferencial, a impedância da trilha da placa é somada às impedâncias das chaves em cada condutor. Assim, é assumido que cada chave acresce 10  $\Omega$  à impedância da trilha, totalizando nominalmente 110  $\Omega$ . Portanto a diferença de impedância que deve ser considerada é de aproximadamente 4,8  $\Omega$  na extensão do canal do DUT.

### 4.2 ESTIMATIVA DE BANDA DE FREQUÊNCIA DO DUT

A segunda análise realizada consistiu na estimativa da banda de frequência do Dispositivo sob Teste. Tal estimativa foi obtida mediante a aquisição dos tempos de subida de borda dos sinais provenientes do DUT, bem como do sistema sem a presença do DUT com

visualização do padrão 10-90. Os resultados obtidos a partir desta medição encontram-se registrados na Tabela 3.

Tabela 3 – Resultados de tempo de subida no padrão 10-90 para estimativa de banda do DUT.

#	Tempo de subida ( <i>rise time</i> )
Sistema com DUT	571 ps
Sistema sem DUT	284 ps

Fonte: Autoria própria.

Através desses dois valores de *rise time* obtidos, pode-se estimar a banda de frequência utilizada pelo DUT:

$$RT_{total} = \sqrt{RT_{DUT}^2 - RT_{sem DUT}^2}$$

$$RT_{total} = \sqrt{(571 \cdot 10^{-12})^2 - (284 \cdot 10^{-12})^2}$$

$$RT_{total} = 495,36 \cdot 10^{-12} s$$

$$RT_{total} = \frac{0,35}{BW_{DUT}} \rightarrow BW_{DUT} = \frac{0,35}{495 \cdot 10^{-12}} = 706,55 \text{ MHz}$$

Nota-se que a banda estimada do DUT ficou bem abaixo da banda estimada do padrão USB 3.0, calculada anteriormente em 2,5 GHz. Devido a isso, foi necessário calcular a banda de frequência do DUT através de outro padrão, o 20-80. Os resultados obtidos se encontram na Tabela 4.

Tabela 4 - Resultados de tempo de subida no padrão 20-80 para estimativa de banda do DUT.

#	Tempo de subida ( <i>rise time</i> )
Sistema com DUT	226,2 ps
Sistema sem DUT	141,9 ps

Fonte: Autoria própria.

Estimando o *rise time* total do sistema para estes valores, tem-se:

$$RT_{total} = \sqrt{RT_{DUT}^2 - RT_{sem DUT}^2}$$

$$RT_{total} = \sqrt{(226,2 \cdot 10^{-12})^2 - (141,9 \cdot 10^{-12})^2}$$

$$RT_{total} = 176,15 \cdot 10^{-12} s$$

Ao se calcular o a banda de frequência utilizada para o padrão 20-80, deve-se considerar o fator de relação entre o *rise time* e banda como 0,22. Ou seja:

$$RT_{total} = \frac{0,22}{BW_{DUT}} \rightarrow BW_{DUT} = \frac{0,22}{176,15 \cdot 10^{-12}} = 1,25 \text{ GHz}$$

Nota-se uma melhora significativa de banda estimada no padrão 20-80 em comparação com a banda estimada no padrão 10-90. Isso significa que o DUT possui várias descontinuidades em sua linha, que por sua vez causam reflexões que impactam nas extremidades inferiores e superiores do sinal, causando distorções.

#### 4.3 ESTIMATIVA DA BANDA DE FREQUÊNCIA DO DE

A terceira análise realizada compreendeu a estimativa da banda de frequência do dispositivo equivalente (DE) ao Dispositivo sob Teste DUT, o cabo USB 3.2.

O resultado da mensuração do tempo de subida do dispositivo equivalente registrou 149,6 ps. Para o cálculo da largura de banda do cabo USB 3.2, utilizou-se igualmente o tempo de subida do sistema quando desprovido de qualquer conexão, previamente determinado em 141,9 ps.

Estimando a banda de frequência do dispositivo equivalente, tem-se:

$$RT_{total} = \sqrt{RT_{DE}^2 - RT_{sem DE}^2}$$

$$RT_{total} = \sqrt{(149,6 \cdot 10^{-12})^2 - (141,9 \cdot 10^{-12})^2}$$

$$RT_{total} = 47,38 \cdot 10^{-12} \text{ s}$$

$$RT_{total} = \frac{0,22}{BW_{DE}} \rightarrow BW_{DE} = \frac{0,22}{47,38 \cdot 10^{-12}} = 4,64 \text{ GHz}$$

Sendo uma interface USB 3.2 Gen 1, sua banda de frequência deve ser de 5 GHz. Com a estimativa feita após a medição pelo setup de testes empregado, pôde-se obter um valor muito próximo. Portanto, esta avaliação permitiu a validação do cenário de testes empregado, dado que o dispositivo selecionado já possui validação de conformidade conforme os requisitos estabelecidos pelo padrão USB 3.2.

#### 4.4 COMPARAÇÃO DE RESULTADOS COM O DISPOSITIVO EQUIVALENTE

Após a realização da estimativa da largura de banda de frequência tanto do DUT quanto do dispositivo equivalente, a análise subsequente consiste na comparação entre os resultados obtidos. O propósito desta subseção reside na comparação dos resultados adquiridos com as informações normativas estipuladas pelo padrão USB.

Ao comparar a largura de banda de frequência do DUT com a largura de banda de frequência obtida do cabo, constata-se uma discrepância de valores. Evidencia-se, a partir deste

contraste, que o DUT não opera conforme os parâmetros esperados, evidenciando resultados abaixo da banda mínima necessária para sustentar a transmissão de dados a 5 Gbps. Enquanto o dispositivo equivalente possui a banda bem próxima da mínima necessária para a transmissão de 10 Gbps.

Outro indicativo da inconformidade do dispositivo com as normas repousa na amplitude do sinal transmitido.

Durante a mensuração do tempo de subida, também se aferiu a amplitude do sinal proveniente do DUT, a qual alcançou 446 mV. Ao confrontar essa amplitude com a do sinal do cabo USB 3.2, que se aproximou de 493 mV, constatou-se uma discrepância substancial. Isso é atribuível às variações abruptas de impedância presentes no DUT, que propiciam ocorrências de reflexão. Tais reflexões, por sua vez, impactam diretamente na amplitude do sinal, desencadeando severos problemas de integridade do sinal.

#### 4.5 VARIAÇÃO DA BANDA DO OSCILOSCÓPIO

Após a variação da banda de frequência do osciloscópio utilizado, foram obtidos os resultados de impedância do DUT apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 – Variação da banda de frequência do osciloscópio.

<b>Banda de frequência</b>	<b>Impedância máxima (<math>\Omega</math>)</b>	<b>Impedância mínima (<math>\Omega</math>)</b>
500 MHz	130,1	94,42
1 GHz	130,1	89,65
3 GHz	131,6	84,24
6 GHz	133,5	83,11
9 GHz	135,1	80,03
12 GHz	138,3	80,26
15 GHz	138,4	79,19
18 GHz	137,4	78,17
21 GHz	140,4	78,1
24 GHz	142,1	77,9
27 GHz	142,5	76,66
30 GHz	141,9	74,31
33 GHz	148	75,09

Fonte: Autoria própria.

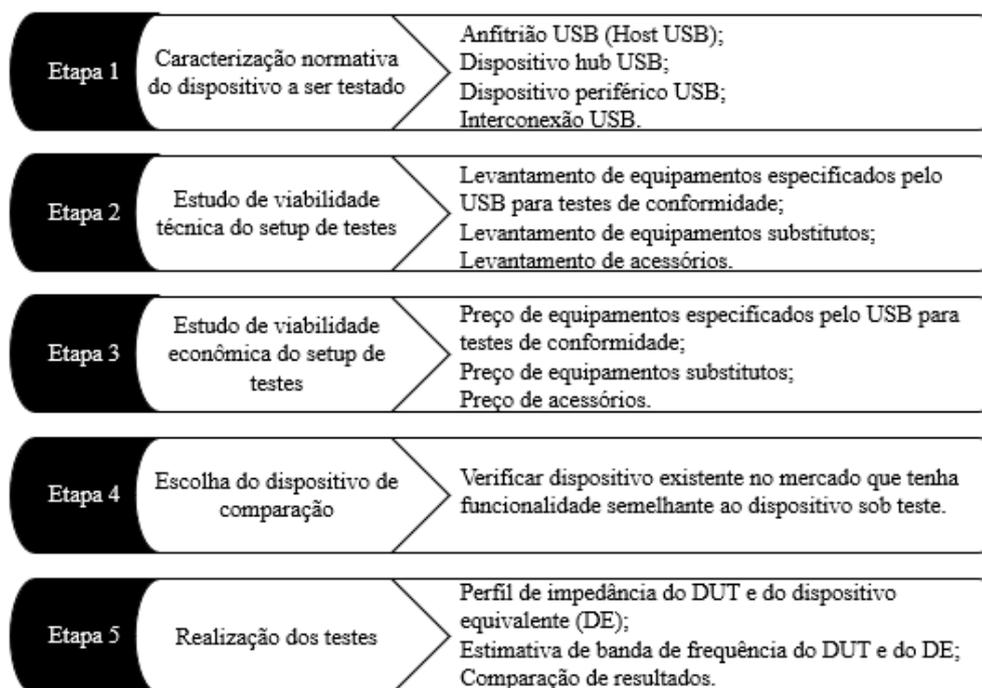
A partir dos resultados obtidos, é possível observar que, do ponto de vista da média entre os valores máximos e mínimos medidos em diferentes faixas de frequência, estes se mostram próximos entre si, situando-se em uma faixa de variação de 107,5  $\Omega$  a 112  $\Omega$ . Entretanto, à medida que a banda de frequência do osciloscópio é ajustada, ocorrem variações significativas na excursão do sinal. Isto é, os valores máximos e mínimos de impedância do Dispositivo sob Teste manifestam consideráveis flutuações.

Verifica-se uma tendência de que, à medida que a frequência é aumentada, a leitura do sinal ocorre de maneira mais rápida e um maior número de variações é capturado pelo osciloscópio. Contudo, é relevante atentar para alguns aspectos a respeito dos resultados obtidos: uma banda de frequência substancialmente inferior àquela requerida pelas normas proporciona um sinal de resolução limitada, caracterizado por uma quantidade reduzida de pontos representativos da impedância real do DUT. Por outro lado, uma banda de frequência excessivamente elevada em relação ao necessário resulta em um sinal ruidoso, dificultando a análise precisa da impedância.

#### 4.6 FLUXOGRAMA DA METODOLOGIA

A Figura 64 apresenta um fluxograma que descreve o cenário de teste e a metodologia utilizada para as validações e testes dos barramentos USB.

Figura 64 – Fluxograma da metodologia proposta.



Fonte: Autoria própria.

## CONCLUSÕES

Neste trabalho foi elaborada uma metodologia para análise de parâmetros de integridade de sinais em barramentos USB 3.0 através de testes de pré-conformidade utilizando a técnica de reflectometria no domínio do tempo (TDR). Para tal objetivo, foram realizadas revisões bibliográficas sobre os assuntos referentes as tecnologias utilizadas. Além disso, foram abordadas pesquisas referentes às principais características do padrão USB 3.0, e um estudo sobre técnicas de caracterização de barramentos, bem como instrumentos utilizados em análises de sinais.

A implementação da metodologia proposta foi realizada de forma satisfatória, de acordo com as etapas descritas no capítulo de materiais e métodos. Possibilitando realizar os testes de pré-conformidade elaborados.

Referente a hipótese e com base nos resultados obtidos, conclui-se que foi possível desenvolver um método de teste de integridade de sinais em barramentos USB 3.0 utilizando a técnica de reflectometria no domínio do tempo para a validação de layouts em placas de circuito impresso destinadas a comunicações de barramentos de alta velocidade, o que facilitou uma análise de pré-conformidade para dispositivos com tecnologias iguais ou similares ao USB 3.0 de forma mais acessível.

A escolha do TDR foi essencial para o projeto, tendo em vista que ele conseguiu atender todas as necessidades no que diz respeito ao custo-benefício, coleta do perfil de impedância do DUT e medição do tempo de subida do mesmo, o que permitiu a estimativa de banda de frequência da placa para validação dos parâmetros com a norma do padrão USB.

Apesar da metodologia ter obtido resultados satisfatórios, têm-se algumas limitações a serem discutidas. A primeira é delas é que este método é uma solução para a análise da camada física do barramento, ou seja, ele indica uma probabilidade de funcionamento do DUT, mas não substitui testes funcionais que devem ser feitos na placa que verifiquem o desempenho do barramento de alta velocidade, como por exemplo a verificação da comunicação do protocolo.

A segunda limitação a ser observada é que o setup de testes empregado não substitui um teste dinâmico, ou seja, a utilização de um componente ou instrumento, como um BERT, que estabeleça uma comunicação interativa com a placa, efetuando a troca de pacotes ou dados digitais para gerar resultados que possibilitem a visualização do diagrama de olho. Esse tipo de teste oferece resultados mais representativos do cenário real.

Como terceira observação é válido enfatizar que a adoção do osciloscópio em substituição ao VNA exigido pelas normas para o setup de testes de interconexão USB pode ter

se revelado uma opção econômica, no entanto, esta decisão não se aplica necessariamente a todos os cenários, onde o dispositivo pode ser caracterizado de maneira distinta. Portanto, é imprescindível conduzir uma análise de viabilidade financeira para avaliar tal aspecto.

Diante desse panorama, para futuras investigações, recomenda-se considerar a integração de ferramentas, como softwares simuladores, na metodologia para a extração de parâmetros S a partir dos resultados obtidos na análise temporal. Essa abordagem mitigaria a necessidade dos testes dinâmicos, permitindo a inserção dos parâmetros S obtidos no programa *IntePar*, utilizado nos testes de conformidade padrão do USB, e, assim, a validação mais precisa dos dispositivos desenvolvidos.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BOGATIN, Eric. **Signal and Power Integrity - Simplified**. 3ª ed. Prentice Hall: Pearson Education, Inc, 2018. 1288 p.

ELESHOP. **LibreVNA 2 ports full VNA 100kHz - 6GHz**. [S. l.]: Eleshop, 2023. Disponível em: <<https://eleshop.eu/librevna-2-ports-full-vna-100khz-6ghz.html>>. Acesso em: 07 ago. 2023.

FOROUZAN, Behrouz A. **Data Communications and Networking**. 5ª ed. McGraw Hill, 2013.

HV TECHNOLOGIES, INC. **The Basics of Time Domain Reflectometry (TDR)**. [S. l.]: HV Technologies, Inc., 2018. Disponível em: <<https://www.hvtechnologies.com/the-basics-of-time-domain-reflectometry-tdr/>>. Acesso em: 10 mar. 2023.

HOROWITZ, P.; HILL, W. **A Arte da Eletrônica: Circuitos Eletrônicos e Microeletrônica**. 3. ed. Bookman, BR: Porto Alegre, 2017. 1157 p.

INTEL CORPORATION. **SuperSpeed USB and Beyond**. Intel Technology Journal, [s.l.], v. 15, n. 2, p. 2-15, 2015. Disponível em: <<https://www.intel.com/content/www/us/en/standards/superspeed-usb-and-beyondarticle.html?wapkw=introduction%20USB>>. Acesso em: 13 mar. 2023.

JOHNSON, H.; GRAHAM, M. **High-speed digital design: a handbook of black magic**. 1. ed. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 1993.

MATTHEWS, James R.; FIORE, Francis A. **Transmission Lines and Communication Networks: An Introduction to Transmission Lines, High-frequency and High-speed Pulse Characteristics and Applications**. Boca Raton: CRC Press, 2018. p. 184.

MATHWORKS. **What is MATLAB?** [S. l.]: MathWorks, 2023. Disponível em: <<https://www.mathworks.com/products/matlab.html>>. Acesso em: 21 jun. 2023

MOHR. **Industry's Highest Resolution Portable Time-Domain Reflectometers**. [S. l.], 2020. Disponível em: <<http://www.mohr-engineering.com/tdr-cable-tester-CT100.php>>. Acesso em: 10 mar. 2023.

PICOTEST. **J2154A PerfectPulse Diferencial TDR**. [S. l.]: Picotest, 2023. Disponível em: <[https://www.picotest.com/products\\_J2154A.html](https://www.picotest.com/products_J2154A.html)>. Acesso em: 20 jun. 2023.

PICOTEST. **TDR Measurement using the J2154A PerfectPulse® Differential TDR and the MSO68B Oscilloscope**. [S. l.]: Picotest, 2022. Disponível em: <<https://www.picotest.com/images/download/application-note-tdr-measurement-using-j2154a-and-mso68b-oscope.pdf>>. Acesso em: 20 jun. 2023.

POZAR, David M. **Microwave engineering**. 4. ed. Danvers: John Wiley & Sons, Inc, 2012. 405 p.

PROAKIS, John G.; SALEHI, Masoud. **Digital Communication**. 5. ed. New York, NY: McGraw-Hill, 2008. 1150 p.

RESSO, Mike; BOGATIN, Eric. **Signal Integrity Characterization Techniques**. 2. ed. Chicago, Illinois: Professional Education International, Inc., 2009. 405 p.

ROHDE&SCHWARZ. **Portfólio de analisadores de redes vetoriais da Rohde & Schwarz**. Precisos, rápidos, versáteis. [S. l.]: Rohde&Schwarz, 2023. Disponível em: <[https://www.rohde-schwarz.com/br/produtos/teste-e-medicao/analises-de-redes\\_64043.html#:~:text=O%20analisador%20de%20redes%20vetoriais,inser%C3%A7%C3%A3o%2C%20ganho\)%2C%20medi%C3%A7%C3%B5es%20de](https://www.rohde-schwarz.com/br/produtos/teste-e-medicao/analises-de-redes_64043.html#:~:text=O%20analisador%20de%20redes%20vetoriais,inser%C3%A7%C3%A3o%2C%20ganho)%2C%20medi%C3%A7%C3%B5es%20de)>. Acesso em: 21 jun. 2023.

SASTRY, P.N.V.M.; RAO, D. N.; VATHSAL, S. e RAJIAH, A. HDL Design Architecture for Compatible Multichannel Multi-frequency Rate SERIAL Bit Error Rate Tester (BERT) ASIC IP Core for Testing of High Speed Wireless System Products/Applications, 2015 Fifth International Conference on Communication Systems and Network Technologies, Gwalior, p. 839-843, 04-06 abr. 2015.

STALLINGS, Willian. **Data and Computer Communications**. 10. ed. [S. l.]: Pearson Education, 2013. 888 p.

TEKTRONIX. **TDR Test** [Brochure]. [S. l.]: Tektronix, 2023a. Disponível em: <<https://www.tek.com/en/documents/primer/tdr-test>>. Acesso em: 13 mar. 2023.

TEKTRONIX. **TBS1000C Digital Storage Oscilloscope** [Brochure]. [S. l.]: Tektronix, 2023b. Disponível em: <<https://www.tek.com/en/products/oscilloscopes/tbs1000>>. Acesso em: 20 jun. 2023.

USB IMPLEMENTERS FORUM. **USB 3.2 Specification**. Release 1.1. [S. l.]: USB Implementers Forum, 2022a. Disponível em: <<https://www.usb.org/document-library/usb-32-specification>>. Acesso em: 10 mar. 2023.

USB IMPLEMENTERS FORUM. **Universal Serial Bus Type-C Cable and Connector Specification**. Release 2.2. [S. l.]: USB Implementers Forum, 2022b. Disponível em: <<https://www.usb.org/document-library/usb-type-cr-cable-and-connector-specification-release-22>>. Acesso em: 10 mar. 2023.

USB IMPLEMENTERS FORUM. **Universal Serial Bus Type-C Connectors and Cable Assemblies Compliance Document**. Release 2.1. [S. l.]: USB Implementers Forum, 2022c. Disponível em: <<https://www.usb.org/document-library/usb-type-c-connectors-and-cable-assemblies-compliance-document>>. Acesso em: 11 jun. 2023.