

Metodologia para Análise de Integridade de Sinais em Barramentos USB 3.0

Emily Gomes de Mesquita
Laboratório de Sistemas Embarcados
Universidade do Estado do Amazonas
Manaus, Brazil
egmesquita25@gmail.com

Yago Costa de Oliveira
Laboratório de Sistemas Embarcados
Universidade do Estado do Amazonas
Manaus, Brazil
yago.cst.oliveira@gmail.com

Fábio Arozo de Albuquerque Júnior
Laboratório de Sistemas Embarcados
Universidade do Estado do Amazonas
Manaus, Brazil
arozojr@gmail.com

Angilberto Muniz Ferreira Sobrinho
Laboratório de Sistemas Embarcados
Universidade do Estado do Amazonas
Manaus, Brazil
asobrinho@uea.edu.br

Ruan Carlos Mota Teixeira
Laboratório de Sistemas Embarcados
Universidade do Estado do Amazonas
Manaus, Brazil
ruan.cmteixeira@gmail.com

Rubens de Andrade Fernandes
Laboratório de Sistemas Embarcados
Universidade do Estado do Amazonas
Manaus, Brazil
rfernandes@uea.edu.br

Resumo—O trabalho apresenta uma metodologia para análise de parâmetros de integridade de sinais em barramentos USB 3.0 através da técnica de reflectometria no domínio do tempo (TDR). O objetivo é viabilizar a análise de pré-conformidade de produtos em fase de desenvolvimento que contenham esse padrão de comunicação. Inicialmente, o padrão de comunicação USB 3.0 e ferramentas analíticas como o TDR são apresentados. Na sequência, detalhamos a metodologia proposta, elucidando desde a caracterização normativa do dispositivo até o estudo de viabilidade técnica e econômica e a execução dos testes. Após isso, concluímos com uma descrição minuciosa de cada fase dos testes, destacando os dados coletados, o desempenho da metodologia e recomendações para refinamento de resultados futuros oriundos da proposta deste trabalho.

Palavras-chave—USB 3.0; integridade de sinais; reflectometria no domínio do tempo; testes de pré-conformidade.

I. INTRODUÇÃO

O Universal Serial Bus (USB) está presente em uma variedade de dispositivos, desde sistemas de armazenamento até smartphones, graças à sua interface intuitiva e capacidade de transferência de alta velocidade [1]. Entre os diversos formatos de USB, o USB-C se destaca. Este conector reversível oferece benefícios como transferência ágil de dados e energia, e adaptabilidade notável para dispositivos móveis [2]. O USB 3.0, que frequentemente utiliza o conector USB-C, alcança velocidades impressionantes de 5 Gbps e mantém a retrocompatibilidade, facilitando a conexão com dispositivos de gerações anteriores [3]. Contudo, mesmo com tais avanços, os barramentos USB enfrentam desafios. A integridade do sinal pode ser comprometida por fatores como interferência eletromagnética, erros de sincronização e ressonância.

Para assegurar a integridade desse sinal, existem normas estabelecidas pelo USB Implementers Forum (USB-IF), a autoridade que supervisiona o padrão USB [2]. No entanto, o teste de conformidade de novos dispositivos apresenta obstáculos. Muitas vezes, há barreiras financeiras para adquirir o equipamento necessário, e um déficit de referências claras e processos detalhados para laboratórios especializados,

complicando a trajetória de desenvolvedores e empresas especializadas em comunicação em análises de pré-conformidades para essas soluções.

Dessa forma, este trabalho sugere o uso da técnica de reflectometria no domínio do tempo como ferramenta chave para avaliar parâmetros de integridade de sinal em barramentos USB 3.0 de alta velocidade. Esta abordagem promete ser uma alternativa eficaz e econômica para as avaliações de pré-conformidade em fases de desenvolvimento, tornando o processo mais inclusivo e acessível.

A estrutura deste artigo é dividida em seções focadas em: (1) fundamentação teórica, (2) a metodologia sugerida, (3) aplicação prática da metodologia e (4) análise crítica dos resultados.

II. REFERENCIAL TEÓRICO

A. O Padrão de Comunicação USB 3.0

O padrão USB 3.0, agora atualizado para USB 3.2 Gen 1, é uma atualização notável em relação às versões anteriores, trazendo velocidades de transferência de dados mais rápidas. Essa versão atinge velocidades de até 5 Gbps, um salto significativo em relação aos 480 Mbps do USB 2.0 [4]. Essa tecnologia também tem um gerenciamento de energia aprimorado, especialmente para dispositivos de alta potência. Para garantir que os sinais sejam transmitidos com clareza, há vários fatores a serem considerados, como velocidade dos dados, intensidade do sinal, níveis de ruído e outros [4].

Os padrões de comunicação USB, incluindo o USB-C, fornecem diretrizes claras para utilização, projetos e avaliação de conectores e cabos. Para ver o desempenho do USB 3.0 em altas velocidades, existem testes específicos. Esses testes visam detectar quaisquer problemas que possam afetar o sinal, garantindo um desempenho consistente. Alguns dos principais testes se concentram na resposta de impulso, interferência, jitter e padrões de ruído [4]. Qualquer inconsistência na impedância do barramento pode afetar a qualidade do sinal.

B. Ferramentas e Instrumentos para Análise de Sinais

A análise de sinal é um procedimento que se aprofunda na exploração e compreensão de informações sobre a dinâmica e características de sinais. Nesse contexto, apresentamos ferramentas para análise de sinais nos domínios do tempo e da frequência:

- **Reflectômetro no Domínio do Tempo (TDR):** Instrumento que emite um sinal de passo de tempo de subida rápido, normalmente de 35 ps a 150 ps, e mede o sinal refletido [5]. Essa medição inclui o perfil de impedância do objeto medido.
- **Analisador de rede vetorial (VNA):** Instrumento utilizado na análise precisa de redes ativas e passivas em tecnologias de comunicação. Sua caracterização é baseada nos parâmetros S, com medições associadas a diferentes fontes de erro, incluindo erros sistemáticos, aleatórios e de deriva [6].
- **Parâmetros de dispersão:** Também conhecidos como parâmetros S, são coeficientes complexos que descrevem a relação entre as portas de um sistema de transmissão e a frequência de operação. Eles podem ser expressos em termos de amplitude e fase ou como números complexos que englobam ambas as propriedades. Amplamente aplicados em projetos de circuitos e análises de sistemas de transmissão, os parâmetros S permitem a previsão do comportamento do sistema sob várias condições de operação [7].

III. METODOLOGIA PROPOSTA

A metodologia é composta por uma série de etapas que incluem a caracterização normativa do dispositivo sob teste (DUT), o estudo da viabilidade técnica e econômica setup de testes, a seleção de um dispositivo de comparação apropriado e a execução dos testes.

A primeira etapa envolveu a caracterização normativa do DUT, que é baseada no USB 3.2, conforme especificado no documento de especificações de cabos e conectores USB Type-C fornecido pela USB-IF [8]. A arquitetura USB 3.2 abrange quatro tipos principais de dispositivos: Host USB, dispositivo host USB, dispositivo periférico USB e interconexão USB.

Após a categorização do DUT, foi realizado um estudo de viabilidade técnica do setup de testes. Essa análise ajudou a identificar abordagens adequadas para testar o dispositivo de acordo com as especificações normativas. Durante essa fase, o equipamento de teste sugerido pelas normas é identificado, bem como o equipamento substituto em potencial para testes de pré-conformidade, incluindo acessórios complementares.

O estudo da viabilidade econômica ocorre simultaneamente ao estudo de viabilidade técnica do setup de testes. Com os equipamentos substitutos levados em consideração, é realizada uma análise comparativa de preços entre o cenário de teste de conformidade estabelecido pelos padrões USB e o cenário de teste de pré-conformidade usando os equipamentos substitutos. Essa avaliação tem como objetivo determinar a relação custo-benefício do cenário de teste de pré-conformidade proposto.

A seleção de um dispositivo de comparação apropriado é muito importante, pois fornece uma referência comparativa para avaliar os resultados obtidos das medições do DUT. É essencial escolher um dispositivo com características, funcionalidades e configurações idênticas ou semelhantes às do DUT, a fim de garantir a confiabilidade dos resultados.

Os testes de pré-conformidade realizados neste estudo tiveram como objetivo validar a camada física do USB 3.0. Para isso, foram realizadas coletas de dados relacionadas a perfis de impedância e estimativas de banda de frequência do DUT. Em seguida, esses dados foram comparados com os obtidos do dispositivo equivalente selecionado para análise. A análise comparativa dos resultados obtidos ajuda a determinar a conformidade do DUT com as especificações normativas do USB 3.0.

Para este estudo, os recursos utilizados incluíram:

- Documentos de especificação do padrão USB 3.2 e especificações de cabos e conectores USB Type-C.
- Cabos: Quatro SMA para SMA de 18 GHz, dois SMA de 40 GHz, dois SMA de 18 GHz, dois USB Tipo C para alimentação Tipo B, um Thunderbolt 3 USB Tipo C e um USB 3.2 Gen 2 Tipo C.
- Equipamento: TDR diferencial J2154A e um osciloscópio MSO 73304DX.
- Fixtures: Dois ZEBAX.
- Ferramentas: Uma chave de torque.

IV. APLICAÇÃO DA METODOLOGIA PROPOSTA

A. Caracterização Normativa do Dispositivo

A placa validada nos testes de conformidade é um protótipo projetado para realizar a multiplexação de barramentos de alta velocidade, que são caracterizados como barramentos USB 3.0. A Figura 1 ilustra um diagrama que representa a operação desse dispositivo de forma simplificada.

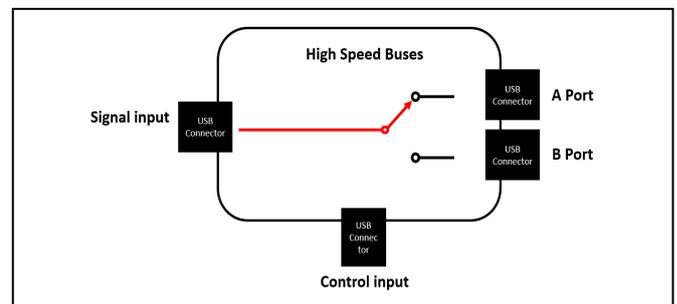


Fig. 1. Diagrama de operação do DUT.

A placa apresenta quatro portas USB Tipo C, uma para entrada de sinal, duas para recepção e uma para controle. Dentro do circuito, um multiplexador seleciona entre as portas A e B para transmitir o sinal, controlado pela porta de controle. O objetivo é manter a integridade do sinal transmitido ao ser recebido pela porta ativa, preservando

aspectos como largura de banda, impedância e outros fatores que podem influenciar a qualidade da transmissão.

Dada a funcionalidade desse protótipo, é apropriado classificá-lo como uma interconexão USB, pois não há troca de mensagens entre o canal USB multiplexado e o DUT.

B. Estudo de viabilidade Técnica do Setup de Testes

A norma do USB recomenda um VNA com pelo menos quatro portas para testes de conformidade de interconexão USB [8]. No entanto, optamos por um TDR diferencial emparelhado com um osciloscópio para testes de pré-conformidade. Como garantir a resolução adequada é fundamental para a visualização clara do sinal e a análise subsequente, o tempo de subida do TDR deve se alinhar estreitamente com os 40 ps especificados pelo padrão USB 3.0.

A seleção do TDR e do osciloscópio adequados requer uma análise profunda de todas as interconexões possíveis. Isso inclui a interface de conexão do equipamento estipulada pelo padrão, usada em conjunto com o TDR. A maioria dos equipamentos no mercado prefere o cabo SMA para SMP como sua conexão para dispositivos, operando em uma largura de banda padrão de 18 GHz. A partir disso, podemos deduzir o tempo de subida intrínseco de tais cabos usando a relação mostrada na equação (1).

$$RT = 0,35/BW \quad (1)$$

A relação entre o tempo de subida (RT) e a frequência da largura de banda (BW) é ilustrada na equação (1). Essa equação oferece uma maneira prática de estimar o tempo de subida de um sinal [8]. Usando essa equação, o cabo em questão tem um tempo de subida aproximado de 19,44 ps. Nesse contexto, RT_1 a RT_n denotam os tempos de subida de cada componente do sistema. Considerando o tempo de subida de 40 ps da especificação USB 3.0, a equação (2) aponta para um tempo de subida de TDR desejado de cerca de 35 ps. Com base nisso, selecionamos o TDR diferencial J2154A para este estudo, que tem um tempo de subida impressionante de 33 ps.

$$RT_F = (RT_1^2 + RT_2^2 + \dots RT_n^2)^{1/2} \quad (2)$$

É essencial avaliar o tempo de subida da conexão entre o TDR e o osciloscópio, que envolve um cabo SMA que segue as especificações típicas do mercado, com uma largura de banda em torno de 40 GHz. Usando a equação (2), podemos calcular o tempo de subida desse cabo, que é de aproximadamente 8,75 ps. Por meio dessas avaliações, podemos medir a largura de banda mínima necessária para o osciloscópio em cerca de 20,84 ps. Aplicando a equação (1), isso significa que o osciloscópio precisa de uma largura de banda de frequência de pelo menos 16,8 GHz.

C. Estudo de viabilidade Técnica do Setup de Testes

Nos testes de pré-conformidade, é fundamental considerar acessórios como dispositivos de teste (fixtures). No entanto, para avaliar os custos, foi feita uma comparação entre uma configuração composta por TDR, osciloscópio e cabos SMA de fase combinada, em substituição a um VNA de largura de

banda de 20 GHz, já que o uso do dispositivo recomendado pela USB-IF é indispensável para os testes de conformidade e pré-conformidade. A Tabela I apresenta as faixas de preço em dólares para cada componente identificado, tanto para o cenário de conformidade quanto de pré-conformidade. Dessa forma, os custos associados ao equipamento selecionado para substituir o VNA, conforme exigido pelos regulamentos do padrão USB, resultaram em um valor aproximado de \$36.830 dólares, gerando uma economia de pouco mais de \$13.000 dólares em comparação com o uso do VNA.

TABLE I. FAIXA DE PREÇO DOS COMPONENTES DOS SETUP DE TESTES.

Componente	Faixa de preço (USD)
VNA 4 Portas 20GHz	A partir de 50.000,00
TDR Diferencial J2154A	A partir de 4.000,00
Osciloscópio 15 GHz	A partir de 32.500,00
2 Cabos de fase casada SMA 40 GHz	A partir de 330,00

^a. Autoria própria.

D. Seleção de um Dispositivo de Comparação

Para este estudo, o DUT está alinhado com o padrão de cabo USB 3.0. Como ponto de comparação, selecionamos o cabo USB 3.2 Gen 2 da Acroname. Embora seja de um padrão mais avançado, esse cabo tem muito em comum com o USB 3.0. Além disso, com sua taxa de transmissão mais rápida de 10 Gbps, prevemos que sua resposta de sinal apresentará menos interferências durante nossas medições.

E. Realização dos Testes

Durante esse estágio, executamos testes de pré-conformidade usando os dispositivos identificados anteriormente. Empregamos um osciloscópio MSO 73304DX, um TDR diferencial J2154A da Picotest e um par de fixtures da marca WILDER. Em termos de conexão, usamos cabos SMA para conectar o osciloscópio e o TDR, cabos SMA para SMP para conectar o dispositivo de teste e o TDR, e cabos USB Tipo C para Tipo B para alimentar o TDR e o DUT. Além disso, usamos cabos USB Tipo C com velocidades de dados a partir de 20 Gbps. A Figura 2 mostra o DUT ao lado de um cabo Thunderbolt 3 (20 Gbps) e um cabo padrão Acroname USB 3.2, que serviu como nosso dispositivo de referência.

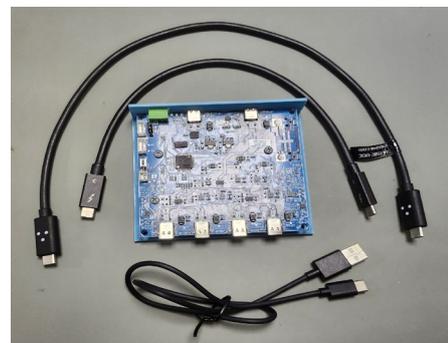


Fig. 2. Acessórios utilizados nos testes de pré-conformidade.

No primeiro teste, nosso objetivo foi analisar o perfil de impedância do DUT. Para isso, o osciloscópio foi conectado ao TDR usando os cabos SMA selecionados. Em seguida, o TDR foi conectado ao dispositivo de teste WILDER com os cabos SMA para SMP. O DUT, por outro lado, foi conectado ao dispositivo de teste WILDER por meio do cabo Thunderbolt 3, utilizando a porta A com um conector USB tipo C. É importante destacar que o cabo USB 3.2 foi conectado à entrada de sinal do DUT, atuando como uma extensão para esse canal, conforme ilustrado na Figura 3.

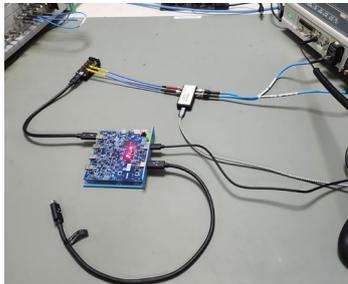


Fig. 3. Setup do teste de perfil de impedância do DUT.

Durante esse teste, os dados foram coletados com o TDR operando em um modo diferencial, em que os canais do osciloscópio foram configurados para combinar os resultados de ambos os canais. Nos testes preliminares, as equações para calcular os coeficientes de reflexão e a impedância do TDR foram aplicadas individualmente a cada canal, com a respectiva representação visual. Nos testes finais, a representação visual foi ajustada para capturar a impedância diferencial do dispositivo.

Essa representação visual é fundamental, pois a impedância relativa ao terminal de aterramento pode variar de um canal para outro ao longo do caminho do sinal, exigindo a captura desse comportamento no modo diferencial. É possível medir a impedância em intervalos de sinal específicos usando a funcionalidade de cursor do osciloscópio. As amostras obtidas foram registradas com o osciloscópio simulando uma operação com uma largura de banda de 15 GHz. Na Figura 4, os cursores foram posicionados para medir a impedância diferencial do DUT, que está em torno de 113 Ω, com um valor mínimo de 82,84 Ω e um pico máximo de 133,35 Ω.

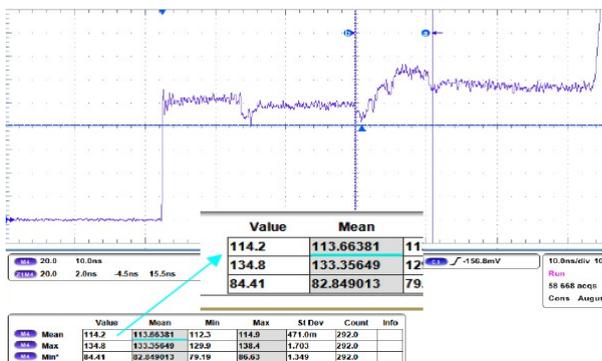


Fig. 4. Impedância do DUT medida no osciloscópio.

A Figura 5 exibe o perfil de impedância do cabo USB 3.2 conectado ao DUT. Nessa configuração, o cabo tem a finalidade de avaliar a impedância após passar pelo DUT, atuando como uma extensão desse canal. A impedância medida nesse cabo é de cerca de 115 Ω, em contraste com seu valor nominal de aproximadamente 90 Ω.

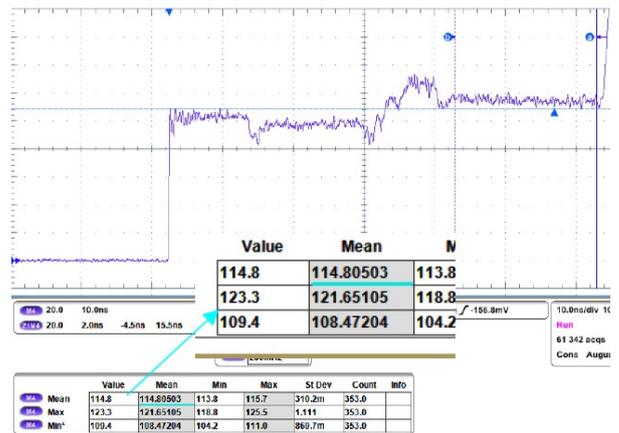


Fig. 5. Impedancia do cabo USB 3.2 com extensão do canal do DUT .

A Figura 6 mostra o teste de medição de impedância somente do cabo USB 3.2, selecionado como o dispositivo equivalente ao DUT. Ele foi conectado diretamente ao dispositivo de fixação WILDER, sem nenhuma conexão com o DUT, resultando em um valor de impedância de 91,29 Ω, conforme ilustrado na Figura 7.

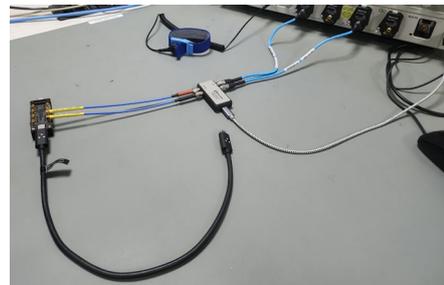


Fig. 6. Setup do teste de perfil de impedância do dispositivo de comparação.

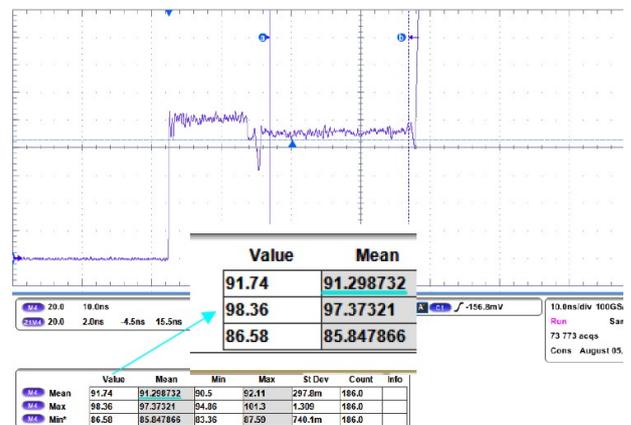


Fig. 7. Impedância do dispositivo de comparação medida no osciloscópio.

O segundo procedimento realizado nos testes envolveu a medição do tempo de subida do DUT. Para essa finalidade, foram realizadas duas medições diferentes para comparação. A primeira envolveu o uso de dois conectores que simulam um curto-circuito USB Tipo C, um com terminais macho e outro com terminais fêmea. Esses conectores foram conectados a dois dispositivos WILDER, com um deles conectado ao TDR e o outro diretamente ao osciloscópio, conforme mostrado na Figura 8. Essa configuração foi estabelecida com o objetivo de minimizar as perdas de frequência, a fim de obter medições mais precisas.

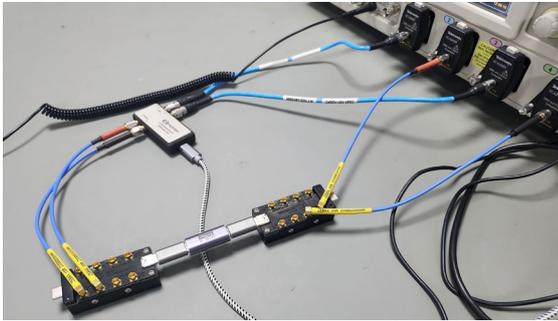


Fig. 8. Setup de teste para o tempo de subida do sistema sem o DUT.

A Figura 9 mostra o tempo de subida obtido com essa configuração, exibido no padrão de tempo de subida 20-80, que representa o tempo necessário para que o sinal mude de 20% para 80% de seu estado final. Essa forma de visualização é comumente usada para interpretar um sinal com precisão, assim como o padrão 10-90. Devido à natureza reflexiva do DUT, o padrão 80-20 foi escolhido, concentrando-se na parte central do sinal, minimizando assim os efeitos das reflexões e, consequentemente, permitindo uma avaliação mais precisa da largura de banda real do dispositivo. É possível observar que o tempo de subida obtido nessa medição foi de aproximadamente 141,9 ps.

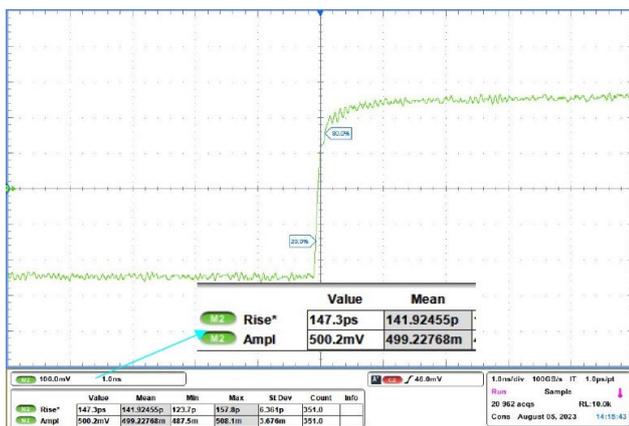


Fig. 9. Medição do tempo de subida do sistema sem o DUT.

Em seguida, a medição foi realizada substituindo o curto-circuito pelo DUT. A Figura 10 mostra que o tempo de subida do sistema com o DUT é de 226,2 ps.

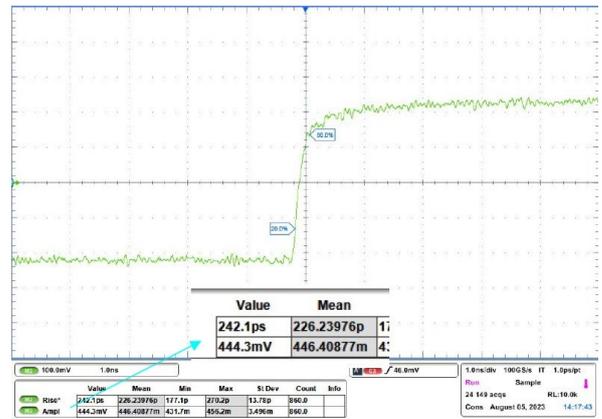


Fig. 10. Medição do tempo de subida do sistema com o DUT.

V. ANÁLISE DE RESULTADOS

A primeira análise realizada envolveu a comparação dos resultados das medições de impedância para o DUT, o dispositivo equivalente e o cabo conectado ao DUT, que emulava a extensão do canal do DUT, com seus respectivos valores nominais. Os registros de medição obtidos para esses componentes, juntamente com seus valores teóricos, são apresentados na Tabela II.

TABLE II. VALORES MEDIDOS E NOMINAIS DOS PERFIS DE IMPEDÂNCIA.

Componente	Impedância Medida (Ω)	Impedância Nominal (Ω)
DUT	113,66	-
Extensão do DUT	114,8	110
Dispositivo de Comparação	91,29	90

b. Autoria própria.

A discrepância entre as impedâncias nominal e medida ocorre devido aos componentes presentes no DUT. O dispositivo incorpora duas chaves multiplexadoras que afetam o caminho do sinal, sendo que cada uma dessas chaves tem uma impedância de 5 Ω . Na visualização do modo diferencial, a impedância do traço da placa é combinada com as impedâncias das chaves em cada condutor. Portanto, supõe-se que cada chave contribua com 10 Ω para a impedância da linha, totalizando nominalmente 110 Ω . Assim, a diferença de impedância a ser considerada na extensão do canal do DUT é de quase 4,8 Ω .

A segunda análise envolveu a estimativa da largura de banda do DUT. Essa estimativa foi obtida pela aquisição dos tempos de subida das bordas do sinal do DUT e do sistema sem o DUT, usando uma visualização de padrão 20-80. Os resultados dessa medição estão registrados na Tabela III.

TABLE III. TEMPO DE SUBIDA PARA A ESTIMATIVA DE BANDA DO DUT.

Componente	Tempo de subida
Sistema com DUT	226,2 ps
Sistema sem DUT	141,9 ps

c. Autoria própria.

Ao calcular o tempo de subida total do sistema com base nesses valores usando (2), foi obtido um valor aproximado de 176,15 ps. Para estimar a largura de banda correspondente ao padrão 20-80, foi considerado um fator de relação de 0,22 entre o tempo de subida e a largura de banda, conforme mostrado na equação (3). Dessa forma, foi obtido um valor de aproximadamente 1,25 GHz.

$$RT = 0,22/BW \quad (3)$$

Ao codificar dois bits de dados por ciclo de clock, a frequência de clock subjacente corresponderá à metade da taxa de dados [5], o que implica que a frequência mínima de largura de banda operacional do padrão USB 3.0 necessária será de 2,5 GHz.

A terceira análise realizada envolveu a estimativa da largura de banda do dispositivo de comparação com o DUT, ou seja, o cabo USB 3.2. A medição do tempo de subida para o dispositivo equivalente produziu um resultado de 149,6 ps. Para calcular a largura de banda do cabo USB 3.2 usando (2), o tempo de subida do sistema sem conexões, previamente determinado em 141,9 ps, também foi usado. Assim, foi obtida uma estimativa da largura de banda do dispositivo equivalente de aproximadamente 4,64 GHz. Como o dispositivo é uma interface USB 3.2 Gen 2, sua largura de banda nominal deve ser de 5 GHz. A estimativa obtida após a medição pela configuração de teste foi muito próxima do valor nominal. Isso validou o cenário de teste empregado, pois o dispositivo escolhido já está em conformidade com os requisitos definidos pelo padrão USB 3.2.

Ao comparar os resultados da largura de banda de frequência do DUT com os resultados do cabo, fica evidente uma discrepância. Esse contraste revela que o DUT não opera dentro dos parâmetros esperados, apresentando resultados abaixo da largura de banda mínima necessária para suportar a transmissão de dados a 5 Gbps. Outra indicação de que o dispositivo não está em conformidade com os padrões é a amplitude do sinal transmitido. Durante a medição do tempo de subida, a amplitude do sinal do DUT também foi avaliada, atingindo 446 mV. Comparando essa amplitude com a do sinal do cabo USB 3.2, que atingiu aproximadamente 493 mV, foi observada uma diferença significativa. Isso se deve a variações bruscas de impedância no DUT, causando reflexões. Essas reflexões, por sua vez, afetam diretamente a amplitude do sinal, resultando em graves problemas de integridade do sinal.

CONCLUSÕES

O trabalho apresenta uma metodologia para analisar a integridade do sinal em barramentos USB 3.0 por meio de testes de pré-conformidade usando a técnica de TDR. A implementação da metodologia foi bem-sucedida, permitindo a execução dos testes de pré-conformidade planejados. Os resultados levaram à conclusão de que o método é eficaz na validação de layouts de placas de circuito impresso destinados a comunicações de alta velocidade, como o USB 3.0. Embora a metodologia tenha limitações, como o foco na camada física do barramento e a não substituição de testes funcionais, o uso do TDR mostrou-se eficiente e econômico. Recomenda-se para trabalhos futuros a incorporação de ferramentas como software de simulação para uma extração mais precisa dos parâmetros S, além da consideração de diferentes cenários para uma análise financeira aprofundada.

REFERÊNCIAS

- [1] Intel Technology, "SuperSpeed USB and Beyond". Intel Technology Journal, 2015, pp. 2-15. Accessed: Jul. 30, 2023. [Online]. Available: <https://www.intel.com/content/www/us/en/standards/superspeed-usb-and-beyondarticle.html?wapkw=introduction%20USB>
- [2] USB Implementers Forum, "Universal Serial Bus Type-C Cable and Connector Specification," USB Implementers Forum, 2022. Accessed: Jul. 30, 2023. [Online]. Available: <https://www.usb.org/document-library/usb-type-cr-cable-and-connector-specification-release-22>
- [3] USB Implementers Forum, " "Universal Serial Bus 3.2 Specification," USB Implementers Forum, 2022. Accessed: Jul. 25, 2023. [Online]. Available: <https://www.usb.org/document-library/usb-32-revision-11-june-2022>
- [4] E. Bogatin, "Signal and Power Integrity – Simplified," 3th ed. Prentice Hall, 2018, pp. 97-122.
- [5] N. Shoab, " "Vector Network Analyzer (VNA) Measurements and Uncertainty Assessment," 1st ed. PoliTO Springer Series, 2017, pp. 4-5.
- [6] J. R. Matthews and F. A. Fior, "Transmission Lines and Communication Networks: An Introduction to Transmission Lines, High-frequency and high-speed Pulse Characteristics and Applications" Boca Raton: CRC Press, 2018. pp. 184.
- [7] M. Resso and E. Bogatin, "Signal Integrity Characterization Techniques" 2nd ed. Professional Education International, Inc., Chicago, Illinois, 2009. pp. 112.
- [8] USB Implementers Forum, " "Universal Serial Bus Type-C Connectors and Cable Assemblies Compliance Document," USB Implementers Forum, 2022. Accessed: Jul. 30, 2023. [Online]. Available: <https://www.usb.org/document-library/usb-type-c-connectors-and-cable-assemblies-compliance-document>