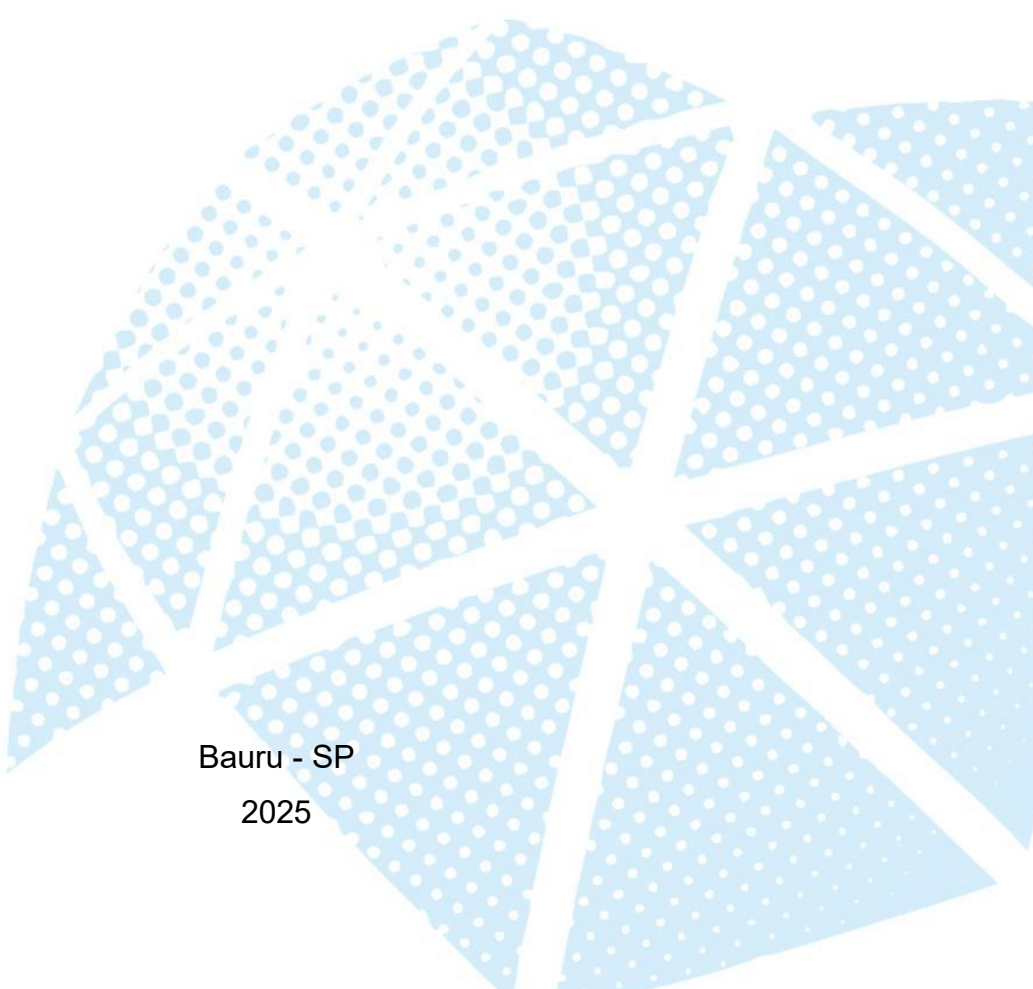


**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
CAMPUS DE BAURU**

GUILHERME MARCONATO REZENDE

**ANÁLISE DOS EFEITOS DA DIAFONIA DE DISPOSITIVOS DE AQUISIÇÃO DE
DADOS EM SISTEMAS DE MONITORAMENTO DE INTEGRIDADE ESTRUTURAL
BASEADOS EM TRANSDUTORES PIEZELÉTRICOS**

Bauru - SP
2025



PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

GUILHERME MARCONATO REZENDE

**ANÁLISE DOS EFEITOS DA DIAFONIA DE DISPOSITIVOS DE AQUISIÇÃO DE
DADOS EM SISTEMAS DE MONITORAMENTO DE INTEGRIDADE ESTRUTURAL
BASEADOS EM TRANSDUTORES PIEZELÉTRICOS**

Dissertação apresentada à Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Engenharia, Bauru, para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Automação

Orientador: Prof. Assoc. Fabricio
Guimarães Baptista

Bauru - SP

2025

R467a

Rezende, Guilherme Marconato

Análise dos efeitos da diafonia de dispositivos de aquisição de dados em sistemas de monitoramento de integridade estrutural baseados em transdutores piezelétricos / Guilherme Marconato

Rezende. -- Bauru, 2025

67 f. : il.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Engenharia, Bauru

Orientador: Fabricio Guimarães Baptista

1. Diafonia. 2. Aquisição de dados. 3. Impedância Eletromecânica.
4. Ondas de Lamb. 5. Emissão acústica. I. Título.

ATA DA DEFESA PÚBLICA DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DE GUILHERME MARCONATO REZENDE, DISCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA, DA FACULDADE DE ENGENHARIA - CÂMPUS DE BAURU.

Aos 30 dias do mês de julho do ano de 2025, às 9h, por meio de Videoconferência, realizou-se a defesa de DISSERTAÇÃO DE MESTRADO de GUILHERME MARCONATO REZENDE, intitulada **ANÁLISE DOS EFEITOS DA DIAFONIA DE DISPOSITIVOS DE AQUISIÇÃO DE DADOS EM SISTEMAS DE MONITORAMENTO DE INTEGRIDADE ESTRUTURAL BASEADOS EM TRANSDUTORES PIEZELÉTRICOS**. A Comissão Examinadora foi constituída pelos seguintes membros: Prof. Dr. FABRICIO GUIMARÃES BAPTISTA (Orientador(a) - Participação Virtual) do(a) Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Bauru UNESP, Prof. Dr. BRUNO ALBUQUERQUE DE CASTRO (Participação Virtual) do(a) Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Bauru UNESP, Prof. Dr. MÁRIO ANDERSON DE OLIVEIRA (Participação Virtual) do(a) Departamento de Engenharia / Birmingham City University. Após a exposição pelo mestrando e arguição pelos membros da Comissão Examinadora que participaram do ato, de forma presencial e/ou virtual, o discente recebeu o conceito final: Aprovado . Nada mais havendo, foi lavrada a presente ata, que após lida e aprovada, foi assinada pelo(a) Presidente(a) da Comissão Examinadora.

Prof. Dr. FABRICIO GUIMARÃES BAPTISTA

IMPACTO POTENCIAL DESTA PESQUISA

Sistemas de monitoramento de integridade estrutural são amplamente estudados por pesquisadores para aplicação em diversas estruturas, como infraestruturas civis e grandes meios de transporte, objetivando maior segurança para os usuários e redução de custos de manutenção através da detecção de danos estruturais em situação inicial. Para maior eficácia desses sistemas, é de interesse o uso de diversos sensores em diferentes locais da estrutura, o que implica na aplicação de vários canais de medição. Dessa forma, os resultados apresentados neste trabalho demonstram a importância de se considerar os efeitos da diafonia de dispositivos de aquisição de dados em sistemas de monitoramento de integridade estrutural, especialmente quando se usam vários canais de aquisição, algo pouco considerado em estudos da área. Os resultados relatados podem ser úteis para pesquisadores no desenvolvimento de plataformas de medição confiáveis para a detecção de danos estruturais.

POTENTIAL IMPACT OF THIS RESEARCH

Structural health monitoring systems are widely studied by researchers for application in various structures, such as civil infrastructures and large means of transportation, aiming at greater safety for users and reduction of maintenance costs through the detection of structural damage in an early stage. For a greater effectiveness of these systems, the use of several sensors in different locations of the structure is of interest, which implies the application of several measurement channels. Thus, the results presented in this work demonstrate the importance of considering data acquisition devices' crosstalk effects in structural health monitoring systems, especially when using several acquisition channels, something that is rarely considered in studies in the area. The reported results may be useful for researchers in the development of reliable measurement platforms for the detection of structural damage.

Dedico este trabalho à minha família.

AGRADECIMENTOS

À minha família, pelo eterno apoio e amor.

Ao meu orientador, Prof. Fabricio Guimarães Baptista, por todo o apoio desde a graduação.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), pelo apoio financeiro, concedido por meio dos Processos 2023/11165-2 e 2022/15759-1.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pelo apoio financeiro, concedido por meio do processo 305067/2022-2.

RESUMO

Os dispositivos de aquisição de dados têm sido largamente utilizados em sistemas de monitoramento de integridade estrutural, permitindo a redução de custos em comparação com alguns instrumentos e o desenvolvimento de sistemas mais versáteis para a aquisição de sinais de múltiplos transdutores. Um problema observado em tais dispositivos é que pode afetar o desempenho de sistemas de monitoramento é o efeito da diafonia. Trata-se da interferência entre os canais dos dispositivos de aquisição de dados e é particularmente crítica quando são utilizados vários canais de aquisição multiplexados. Essa interferência, mesmo que aparentemente pequena, pode prejudicar a detecção de danos estruturais incipientes, que é o objetivo dos sistemas de monitoramento. Neste trabalho, o interesse é por sistemas de monitoramento baseados em transdutores piezelétricos, tais como os métodos da impedância eletromecânica, ondas guiadas e emissão acústica. Devido ao efeito piezelétrico, quando um transdutor é fixado à estrutura a ser monitorada é estabelecida uma interação entre as propriedades mecânicas da estrutura e as propriedades elétricas do transdutor. Desta forma, é possível monitorar a integridade da estrutura por meio da medição e análise dos sinais elétricos do transdutor. No entanto, a diafonia pode alterar o sinal elétrico do transdutor e dificultar a detecção de danos estruturais pequenos. Assim, este trabalho tem como objetivo realizar uma análise experimental dos efeitos da diafonia nos métodos não-destrutivos com transdutores piezelétricos mencionados acima, tendo como foco principal a impedância eletromecânica. Além disso, dois métodos de mitigação dos efeitos da diafonia foram testados para aplicação em sistemas de monitoramento, um baseado na caracterização da diafonia por função de resposta em frequência e outro baseado no uso de seguidores de tensão. Os resultados obtidos indicam que a diafonia pode ser significativa nesses sistemas de monitoramento, podendo levar a diagnósticos falsos da estrutura monitorada. Além disso, também indicam que a diafonia é dependente de parâmetros do dispositivo de aquisição de dados, sendo diretamente proporcional à taxa de amostragem e impedância de carga e inversamente proporcional à frequência do sinal de excitação. Resultados obtidos para os testes com os métodos de mitigação analisados indicam eficácia na minimização dos efeitos da diafonia, sendo o baseado em seguidores de tensão mais simples e eficiente.

Palavras-chave: aquisição de dados; transdutores piezelétricos; diafonia; impedância eletromecânica; ondas guiadas; emissão acústica.

ABSTRACT

Data acquisition devices have been widely used in structural health monitoring systems, allowing cost reduction when compared to some instruments and the development of more versatile systems for signal acquisition from multiple transducers. One problem observed in such devices that can affect the performance of monitoring systems is the crosstalk effect. It is the interference between the channels of data acquisition devices and is particularly critical when several multiplexed acquisition channels are used. This interference, even if apparently small, can impair the detection of incipient structural damage, which is the objective of monitoring systems. In this work, the interest lies in monitoring systems based on piezoelectric transducers, such as the electromechanical impedance, guided waves and acoustic emission methods. Due to the piezoelectric effect, when a transducer is fixed in the structure to be monitored, an interaction is established between the mechanical properties of the structure and the electrical properties of the transducer. In this way, it is possible to monitor the integrity of the structure by measuring and analyzing the electrical signals from the transducer. However, crosstalk can alter the transducer's electrical signal and make it difficult to detect small structural damage. Thus, this work aims to perform an experimental analysis of the effects of crosstalk in the non-destructive methods with piezoelectric transducers mentioned above, focusing mainly on the electromechanical impedance method. In addition, two methods to mitigate the crosstalk effects were tested for application in monitoring systems, one based on the crosstalk characterization by a frequency response function and the other based on the use of voltage followers. The results obtained indicate that crosstalk can be significant in these monitoring systems and may lead to false diagnoses of the monitored structure. In addition, they also indicate that crosstalk is dependent on parameters of the data acquisition device, being directly proportional to the sampling rate and load impedance and inversely proportional to the frequency of the excitation signal. Results obtained for the tests with the analyzed mitigation methods indicate effectiveness in minimizing the effects of crosstalk, with the one based on voltage followers being simpler and more efficient.

Keywords: data acquisition; piezoelectric transducers; crosstalk; electromechanical impedance; guided waves; acoustic emission.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Medição da impedância de um transdutor piezelétrico instalado em uma placa de alumínio utilizando-se um analisador de impedância comercial	20
Figura 2 – Placa de alumínio com 16 transdutores piezelétricos instalados para detecção de danos baseada no método das ondas de Lamb.....	23
Figura 3 – Exemplos de sinais de um sensor piezelétrico correspondentes às ondas de Lamb para uma placa de alumínio na condição íntegra e com dano estrutural ...	24
Figura 4 – Sinal de emissão acústica obtido a partir do método da quebra do grafite	25
Figura 5 – Etapas de um sistema completo de monitoramento	27
Figura 6 – Diafonia (<i>crosstalk</i>) entre dois canais de um dispositivo DAQ	28
Figura 7 – Exemplo de diafonia causada por um sinal de excitação do tipo <i>burst</i> em um sistema de SHM baseado no método de ondas de Lamb	29
Figura 8 – Diagrama do método de mitigação dos efeitos da diafonia por função de resposta em frequência.....	30
Figura 9 – Diagrama do método de mitigação dos efeitos da diafonia por seguidor de tensão aplicado ao método da impedância eletromecânica	31
Figura 10 – Diagrama do Experimento 1	34
Figura 11 – Equipamentos empregados neste trabalho	36
Figura 12 – Diagrama do Experimento 3.....	37
Figura 13 – Diagrama do Experimento 4.....	38
Figura 14 – Diagrama do Experimento 5.....	39
Figura 15 – Sinais no tempo: Diafonia nos canais de medição adjacentes do dispositivo DAQ NI USB-6361	43
Figura 16 – Sinais no tempo: Diafonia nos canais de medição adjacentes do dispositivo DAQ NI USB-6366	44
Figura 17 – Sinais no tempo: Diafonia nos canais de medição adjacentes do dispositivo DAQ NI PXIe-1071	45
Figura 18 – Densidades espectrais de potência dos sinais amostrados no dispositivo DAQ NI USB-6361	46
Figura 19 – Densidades espectrais de potência dos sinais amostrados no dispositivo DAQ NI USB-6366	46

Figura 20 – Densidades espectrais de potência dos sinais amostrados no dispositivo DAQ NI PXIe-1071	47
Figura 21 – Efeitos da taxa de amostragem e da impedância de carga na diafonia de um dispositivo de aquisição de dados	48
Figura 22 – Sinais de resposta dos sensores 1 e 2 aplicados ao método de ondas guiadas	50
Figura 23 – Sinais de resposta dos sensores 1 e 2 aplicados ao método da emissão acústica.....	51
Figura 24 – Partes reais das curvas de impedância elétrica do Sensor 2 obtidas como referência, sob efeito da diafonia e com dano pequeno	53
Figura 25 – Índices RMSD calculados de 30 kHz a 50 kHz, com subfaixas de 1 kHz, para os casos com diafonia e com dano	54
Figura 26 – Magnitude da FRF de caracterização de diafonia obtida para o sinal resultante da diafonia no canal AI1, conectado ao Sensor2, em relação ao sinal amostrado no canal AI0	56
Figura 27 – Partes reais das curvas de impedância elétrica do Sensor 2 obtidas como referência, sob efeito da diafonia e com efeitos da diafonia mitigados por FRF	57
Figura 28 – Magnitudes das FRFs obtidas para três transdutores piezelétricos de mesmo modelo instalados em estruturas diferentes	58
Figura 29 – Partes reais das curvas de impedância elétrica do Sensor 2 obtidas como referência e sob efeito da diafonia, com e sem mitigação por seguidor de tensão ...	59
Figura 30 – Índices RMSD calculados de 30 kHz a 50 kHz, com subfaixas de 1 kHz, para os casos com diafonia, com dano e com diafonia mitigada	60
Figura 31 – Comparação dos métodos de mitigação da diafonia por FRF e por seguidor de tensão aplicados aos métodos de ondas guiadas e emissão acústica..	61

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Características dos dispositivos DAQ utilizados	33
--	----

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A/D	Conversor Analógico-Digital
D/A	Conversor Digital-Analógico
DAQ	<i>Data Acquisition</i> – Aquisição de Dados
FRF	Função de Resposta em Frequência
PCB	<i>Printed Circuit Board</i> – Placa de Circuito Impresso
PGA	<i>Programmable Gain Amplifier</i> – Amplificador de Ganho Programável
PSD	<i>Power Spectral Density</i> – Densidade Espectral de Potência
PZT	<i>Pb-Lead Zirconate Titanate</i> – Titanato Zirconato de Chumbo
RMSD	<i>Root Mean Square Deviation</i> – Desvio da Raiz Média Quadrática
SHM	<i>Structural Health Monitoring</i> – Monitoramento de Integridade Estrutural

LISTA DE SÍMBOLOS

j	Unidade imaginária
f	Frequência
C	Capacitância estática do transdutor
E	Campo elétrico
T	Tensão mecânica
d	Constante piezelétrica
s	Constante de elasticidade
ϵ	Permissividade dielétrica
Z_E	Impedância elétrica do transdutor
Z_P	Impedância mecânica do transdutor
Z_S	Impedância mecânica da estrutura
Z_1	Impedância elétrica do transdutor para estrutura íntegra
Z_2	Impedância elétrica do transdutor para estrutura em monitoramento
CT	Diafonia ou <i>crosstalk</i>
v_2	Tensão eficaz medida no canal 2
$v_{1,2}$	Tensão eficaz da diafonia no canal 1 causada pelo canal 2

LISTA DE PUBLICAÇÕES

Artigo publicado em periódico

REZENDE, G. M.; BAPTISTA, F. G. Crosstalk in DAQ-based measurement platforms for structural health monitoring: effects on damage detection and mitigation methods. **Measurement Science and Technology**, v. 36, p. 055601, 2025. DOI: 10.1088/1361-6501/add30f

Trabalho publicado em anais de congresso

REZENDE, G. M.; BAPTISTA, F. G. Crosstalk effects of data acquisition devices on acoustic emission-based inspections. In: **2nd International Conference on Durability, Repair and Maintenance of Structures. DRMS 2025**. Proceedings in Engineering Mechanics. Springer, Cham, 2025. DOI: 10.1007/978-3-031-96476-3_5

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
2	MÉTODOS DE DETECÇÃO DE DANOS	20
2.1	IMPEDÂNCIA ELETROMECAÂNICA	20
2.2	ONDAS GUIADAS	22
2.3	EMIÇÃO ACÚSTICA	24
3	DIAFONIA EM DISPOSITIVOS DE AQUISIÇÃO DE DADOS	27
3.1	MÉTODOS DE MITIGAÇÃO DOS EFEITOS DA DIAFONIA	30
4	MATERIAL E MÉTODO	33
4.1	EXPERIMENTO 1 – EFEITOS DA DIAFONIA EM DISPOSITIVOS DE AQUISIÇÃO DE DADOS.....	33
4.2	EXPERIMENTO 2 – EFEITOS DA TAXA DE AMOSTRAGEM E DA IMPEDÂNCIA DE CARGA NA DIAFONIA.....	35
4.3	EXPERIMENTO 3 – EFEITOS DA DIAFONIA NO MÉTODO DE ONDAS GUIADAS	36
4.4	EXPERIMENTO 4 – EFEITOS DA DIAFONIA NO MÉTODO DE EMIÇÃO ACÚSTICA.....	38
4.5	EXPERIMENTO 5 – EFEITOS DA DIAFONIA NO MÉTODO DA IMPEDÂNCIA ELETROMECAÂNICA.....	38
4.6	EXPERIMENTO 6 – MITIGAÇÃO DOS EFEITOS DA DIAFONIA	40
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	43
5.1	EXPERIMENTO 1 – EFEITOS DA DIAFONIA EM DISPOSITIVOS DE AQUISIÇÃO DE DADOS.....	43
5.2	EXPERIMENTO 2 – EFEITOS DA TAXA DE AMOSTRAGEM E DA IMPEDÂNCIA DE CARGA NA DIAFONIA.....	48
5.3	EXPERIMENTO 3 – EFEITOS DA DIAFONIA NO MÉTODO DE ONDAS GUIADAS	49
5.4	EXPERIMENTO 4 – EFEITOS DA DIAFONIA NO MÉTODO DE EMIÇÃO ACÚSTICA.....	51
5.5	EXPERIMENTO 5 – EFEITOS DA DIAFONIA NO MÉTODO DA IMPEDÂNCIA ELETROMECAÂNICA.....	52
5.6	EXPERIMENTO 6 – MITIGAÇÃO DOS EFEITOS DA DIAFONIA	55
6	CONCLUSÃO	63

REFERÊNCIAS65

1 INTRODUÇÃO

O interesse deste trabalho está na análise dos efeitos da diafonia, do inglês *crosstalk*, dos dispositivos de aquisição de dados em sistemas de monitoramento de integridade estrutural com transdutores piezelétricos. Tais transdutores têm como princípio de operação a piezeletricidade, que é o termo empregado para descrever a propriedade que alguns materiais, também chamados de materiais “inteligentes” ou multifuncionais por alguns autores, têm de gerar uma carga elétrica ao serem submetidos a uma tensão mecânica. Tal efeito é conhecido como efeito piezelétrico direto. Esses materiais também apresentam o efeito piezelétrico reverso, isto é, eles sofrem uma deformação mecânica quando um campo elétrico é aplicado. Vários materiais apresentam essas propriedades, sendo um dos mais conhecidos as cerâmicas de titanato zirconato de chumbo, popularmente chamadas de cerâmicas de PZT, do inglês Pb (*lead*) *zirconate titanate*.

Com base nesse princípio, esses materiais podem ser empregados para o desenvolvimento de transdutores piezelétricos, que permitem tanto a conversão de energia mecânica em energia elétrica quanto a conversão da energia elétrica em energia mecânica. Assim, esses transdutores podem ser utilizados na forma passiva como sensores, com base no efeito piezelétrico direto, e na forma ativa como atuadores, tendo como princípio o efeito piezelétrico reverso. Na forma passiva, os transdutores piezelétricos são utilizados em muitas aplicações como microfones, hidrofones para escuta subaquática, captadores, ignitores, sensores de vibração, dentre outras. Já na forma ativa, as aplicações incluem microposicionadores, microbombas, impressoras, localizadores de peixes e imagens médicas ultrassônicas. Em algumas aplicações, um mesmo transdutor pode operar tanto como sensor como atuador.

Os transdutores piezelétricos também têm sido largamente utilizados em sistemas de monitoramento, que são a aplicação de interesse deste trabalho. Esses sistemas podem ser utilizados para o monitoramento de integridade estrutural, ou SHM do termo em inglês *structural health monitoring* (Gordan *et al.*, 2022; Sofi *et al.*, 2022). Diversas estruturas podem ser monitoradas, tais como infraestruturas civis (pontes, barragens, tubulações etc.), grandes meios de transporte (aeronaves, navios etc.), entre outras. Dos pontos de vista científico e econômico, o monitoramento de tais estruturas permite que um dano incipiente seja detectado antes que um colapso

estrutural ocorra, garantindo a segurança de seus usuários e possibilitando um planejamento de manutenção eficiente. Isso ocorre pois, dessa forma, equipes de monitoramento terão as informações necessárias para avaliar os riscos dos danos detectados, classificando-os como urgentes ou não, permitindo o agendamento de manutenções preditivas antes que os danos atinjam estados críticos, podendo reduzir significativamente os custos.

Também é possível o monitoramento de processos industriais, tais como a retificação de peças. O processo de retificação está situado na fase final da cadeia de produção e oferece um alto valor agregado ao produto. Os danos causados na peça nessa fase são de alto custo, pois os processos anteriores, além da própria retificação, são perdidos. Portanto, um sistema de monitoramento da integridade das peças é de grande relevância (He *et al.*, 2019).

É desejável que o método de detecção de danos ou falhas seja não destrutivo, isto é, minimamente invasivo à estrutura ou processo para que o monitoramento possa ocorrer em tempo real ou de forma periódica sem causar danos permanentes para a avaliação. Há vários métodos não destrutivos reportados na literatura. Neste trabalho, o interesse é pelos métodos baseados em transdutores piezelétricos, com destaque para os métodos da impedância eletromecânica, ondas guiadas e emissão acústica. Esses métodos têm como princípio o efeito piezoelétrico que estabelece um acoplamento eletromecânico entre o transdutor e a estrutura monitorada, sendo que, dependendo do método, o transdutor é usado como sensor, atuador, ou como ambos.

Como plataformas de medição em sistemas de SHM empregando esses métodos, tanto equipamentos comerciais quanto sistemas de medição alternativos são amplamente utilizados por pesquisadores. Dispositivos de aquisição de dados, ou dispositivos DAQ do termo em inglês *data acquisition*, são comumente utilizados em tais sistemas (Laflamme *et al.*, 2023; Fu; Zhou; Guo, 2024), já que tendem a ser mais versáteis e baratos quando comparados a equipamentos comerciais, e são de interesse deste trabalho.

Qualquer que seja o método de detecção de dano utilizado, o processo tem como etapa inicial a aquisição de sinais dos transdutores piezelétricos por meio do dispositivo DAQ. Dessa forma, a qualidade dos sinais obtidos nessa etapa inicial é fundamental para a correta detecção de dano estrutural, especialmente para a detecção de pequenos danos, uma vez que danos estruturais incipientes implicam em pequenas variações nos sinais dos transdutores piezelétricos. No entanto, nos

dispositivos de aquisição de dados, há um efeito conhecido como diafonia, que se trata de interferências eletromagnéticas entre os diversos canais de aquisição e, portanto, são especialmente críticas em sistemas de monitoramento com múltiplos transdutores (Atzori *et al.*, 2021). É importante notar que, em sistemas de SHM, a diafonia pode ocorrer devido a diversos fatores, como qualidade do cabeamento e proximidade dos transdutores (Vieira Filho *et al.*, 2024; Qiu *et al.*, 2012), que podem ser mitigados, por exemplo, através do uso de blindagem eletromagnética. Este trabalho, contudo, analisa os efeitos da diafonia entre os próprios canais de medição do dispositivo DAQ, que podem ser especialmente críticos por não poderem ser minimizados alterando-se a configuração do experimento, como o cabeamento e posicionamento já citados. Assim, a diafonia é intrínseca ao dispositivo DAQ e deve ser considerada em sistemas de SHM para uma detecção de dano estrutural confiável.

Portanto, visto que os efeitos da diafonia dos dispositivos de aquisição de dados podem desempenhar um papel importante nos sistemas de monitoramento de integridade estrutural, especialmente na detecção de pequenos danos, é objetivo deste trabalho analisá-los. Esses efeitos são analisados nos métodos da impedância eletromecânica, ondas guiadas e emissão acústica. Atenção especial é dada ao método da impedância eletromecânica, visto que nele a diafonia não é facilmente observada nas assinaturas de impedância dos transdutores, em contraste com os métodos de ondas guiadas e emissão acústica, nos quais a diafonia é facilmente percebida nos sinais de tensão de resposta dos transdutores. Além disso, dois métodos de mitigação da diafonia de fácil aplicação, baseados na função de resposta em frequência (FRF) de canais de medição adjacentes e no uso de seguidores de tensão com amplificadores operacionais, são avaliados e comparados.

Este trabalho está organizado em seis seções. A Seção 1 apresenta uma introdução ao tema a ser discutido e os objetivos. A Seção 2 apresenta os métodos de detecção de danos explorados neste trabalho, nos quais os efeitos da diafonia são analisados. A Seção 3 apresenta uma revisão acerca dos efeitos da diafonia em dispositivos de aquisição de dados e introduz dois métodos de compensação. A Seção 4 apresenta uma descrição dos experimentos realizados para este trabalho. A Seção 5 apresenta os resultados de cada experimento. Por fim, a Seção 6 apresenta as conclusões da dissertação, seguida da lista de referências bibliográficas.

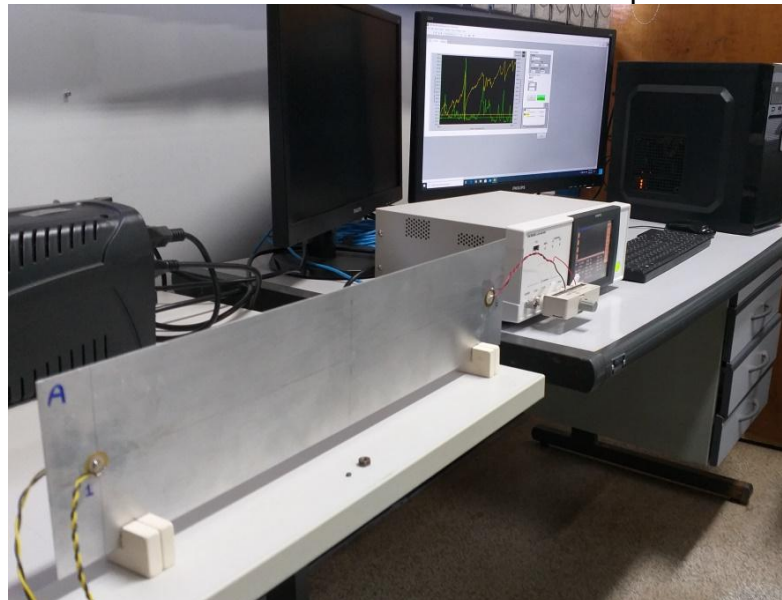
2 MÉTODOS DE DETECÇÃO DE DANOS

Como já mencionado, este trabalho tem como interesse os métodos de detecção de danos baseados em transdutores piezelétricos, mais especificamente os métodos da impedância eletromecânica, ondas guiadas e emissão acústica. Nesta seção, esses métodos são apresentados de forma sucinta.

2.1 IMPEDÂNCIA ELETROMECÂNICA

O método da impedância eletromecânica tem recebido atenção para o desenvolvimento de sistemas de monitoramento pela sua simplicidade de instalação, pois um único transdutor piezelétrico opera simultaneamente como sensor e atuador (Tenreiro; Lopes; da Silva, 2022; Tamhane; Banerjee; Tallur, 2022). Basicamente, o método consiste em fixar o transdutor à região de interesse da estrutura, normalmente utilizando-se um adesivo de alta rigidez, e medir a sua impedância por meio de um analisador de impedância ou outro sistema de medição equivalente. Como um exemplo, na Figura 1 apresenta-se um transdutor piezelétrico instalado em uma placa de alumínio, estrutura típica usada em laboratórios de pesquisa, tendo sua impedância elétrica medida por um analisador de impedância comercial HIOKI IM3536.

Figura 1 – Medição da impedância de um transdutor piezelétrico instalado em uma placa de alumínio utilizando-se um analisador de impedância comercial



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Devido ao efeito piezelétrico, uma relação é estabelecida entre a impedância elétrica do transdutor e a impedância mecânica da estrutura. Pesquisadores têm desenvolvido diversos modelos para descrever essa relação. Em um dos modelos mais simplificados, essa relação é dada por

$$Z_E(f) = \frac{1}{j2\pi fC} \left(1 - \frac{d_{31}^2}{s_{11}^E \varepsilon_{33}^T} \frac{Z_S(f)}{Z_S(f) + Z_P(f)} \right)^{-1} \quad (1)$$

sendo $Z_E(f)$ a impedância elétrica do transdutor, $Z_S(f)$ a impedância mecânica da estrutura monitorada, $Z_P(f)$ a impedância mecânica do transdutor, f a frequência, C a capacitância do transdutor, j a unidade imaginária e d_{31} , s_{11}^E e ε_{33}^T são as constantes piezelétrica, de elasticidade e dielétrica, respectivamente. Os subscritos 1 e 3 indicam a componente tensorial para uma suposição unidimensional e os sobrescritos E e T indicam, respectivamente, campo elétrico e tensão mecânica constantes.

Segundo a Equação (1), a impedância mecânica da estrutura e a impedância elétrica do transdutor estão relacionadas, de modo que variações na impedância mecânica da estrutura, causadas pela ocorrência de danos estruturais como rachaduras e corrosão, causam variações equivalentes na impedância elétrica do transdutor. Dessa forma, a integridade da estrutura pode ser monitorada por meio da medição e análise da impedância elétrica de um transdutor piezelétrico (Campeiro, 2021). Uma assinatura de impedância é obtida para a estrutura em estado íntegro e usada como referência, sendo as medições de impedância subsequentes normalmente comparadas a ela através de índices de dano. Neste trabalho, usou-se o índice de dano RMSD, comumente empregado em sistemas de monitoramento (Ferreira *et al.*, 2022) e baseado na norma euclidiana entre as assinaturas de impedância. O índice RMSD, neste trabalho, é calculado segundo da Silva, Budoya e Baptista (2024), conforme a equação abaixo:

$$RMSD = \sqrt{\frac{1}{K} \sum_{f=1}^K \{Re[Z_2(f)] - Re[Z_1(f)]\}^2} \quad (2)$$

sendo $Z_1(f)$ a assinatura de impedância obtida para a estrutura em estado íntegro, $Z_2(f)$ a assinatura de impedância obtida para a estrutura durante seu monitoramento,

caso no qual pode haver dano, e K o número de pontos de frequência dentro da faixa analisada.

Além dos analisadores de impedância comerciais, como o apresentado na Figura 1, tem sido cada vez mais comum o uso de sistemas de medição alternativos com dispositivos de aquisição de dados (Lambinet; Khodaei, 2022). Nesses sistemas, a excitação do transdutor é geralmente feita por sinais de excitação do tipo *chirp*, que possuem várias frequências. Assim, a análise dos efeitos da diafonia é fundamental para assegurar a qualidade das medições e a viabilidade da detecção de pequenos danos.

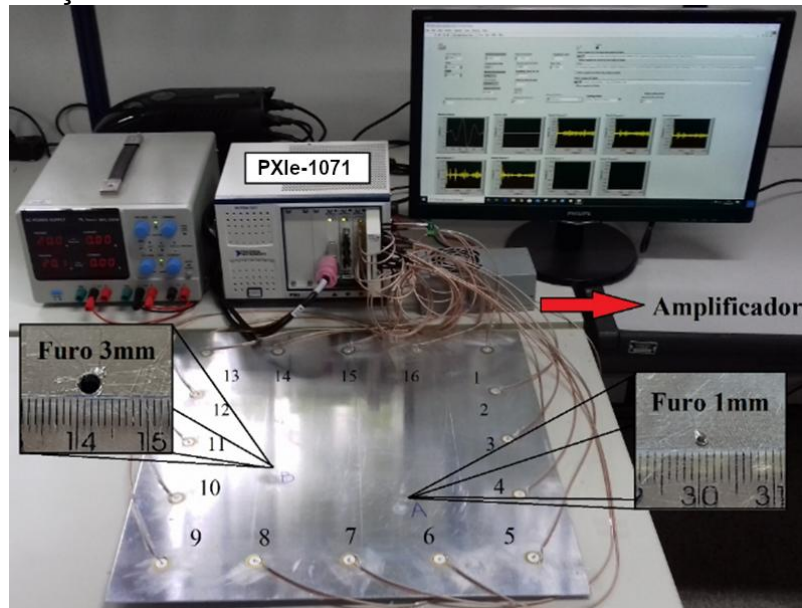
O método da impedância eletromecânica recebe o foco principal deste trabalho, mas outras metodologias de detecção de danos apresentam procedimentos experimentais semelhantes e também são exploradas, como detalhado nas próximas seções.

2.2 ONDAS GUIADAS

O método das ondas guiadas para detecção de danos é conhecido por sua alta sensibilidade ao dano. Neste trabalho, o interesse é pelas ondas que se propagam em estruturas finas como placas, conhecidas como ondas de Lamb (Draudvilienė; Meškauskienė, 2022). Ao contrário da técnica da impedância eletromecânica, abordada na seção anterior, que utiliza ao menos um transdutor operando simultaneamente como atuador e sensor, na detecção de dano baseada em ondas de Lamb são utilizados transdutores distintos, sendo um atuador para a geração do sinal de excitação e sensores para a sua recepção. Os sinais medidos pelos sensores dependem das características de propagação de ondas no percurso entre o atuador e os sensores e, conseqüentemente, são alterados na presença de um dano estrutural, que altera tais características (Campeiro, 2021).

Portanto, em sistemas de monitoramento baseados em ondas de Lamb, normalmente são utilizados vários transdutores para serem obtidos vários caminhos de onda. A título de exemplo, um arranjo experimental com 16 transdutores instalados em uma placa de alumínio de uma pesquisa anterior coordenada pelo orientador é apresentado na Figura 2 (Campeiro, 2021).

Figura 2 – Placa de alumínio com 16 transdutores piezelétricos instalados para detecção de danos baseada no método das ondas de Lamb

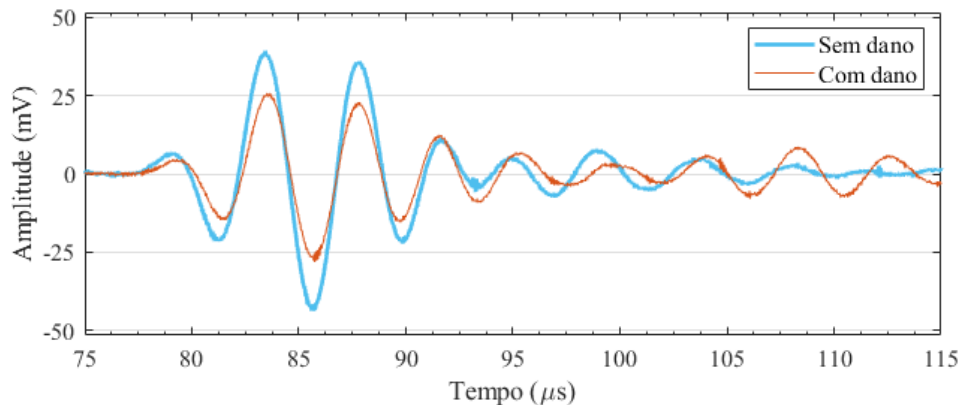


Fonte: Campeiro (2021).

No arranjo experimental da Figura 2, dois orifícios de diâmetros diferentes foram feitos na estrutura para simular danos estruturais. A geração do sinal de excitação e a aquisição dos sinais de resposta são realizadas por meio de um dispositivo de aquisição de dados PXI controlado por software LabVIEW. Além disso, como o método das ondas de Lamb exige um sinal de excitação de amplitude elevada, um amplificador normalmente é utilizado, como indicado na figura.

Como sinal de excitação, tipicamente é utilizado um sinal tipo *burst* com alguns ciclos na frequência de interesse. Nesses sistemas, os transdutores operam como sensores, com exceção de um, que opera como atuador. A função de atuador pode ser alternada entre todos os transdutores presentes, em diferentes etapas de medição, obtendo-se diversos percursos de propagação de onda, permitindo uma localização satisfatória do dano estrutural. Em caso de dano próximo a algum percurso, o sinal do sensor será alterado. Na Figura 3 são apresentados os sinais de resposta de um sensor obtidos para uma placa de alumínio na condição íntegra e na presença de um dano estrutural.

Figura 3 – Exemplos de sinais de um sensor piezelétrico correspondentes às ondas de Lamb para uma placa de alumínio na condição íntegra e com dano estrutural



Fonte: Elaboração do próprio autor.

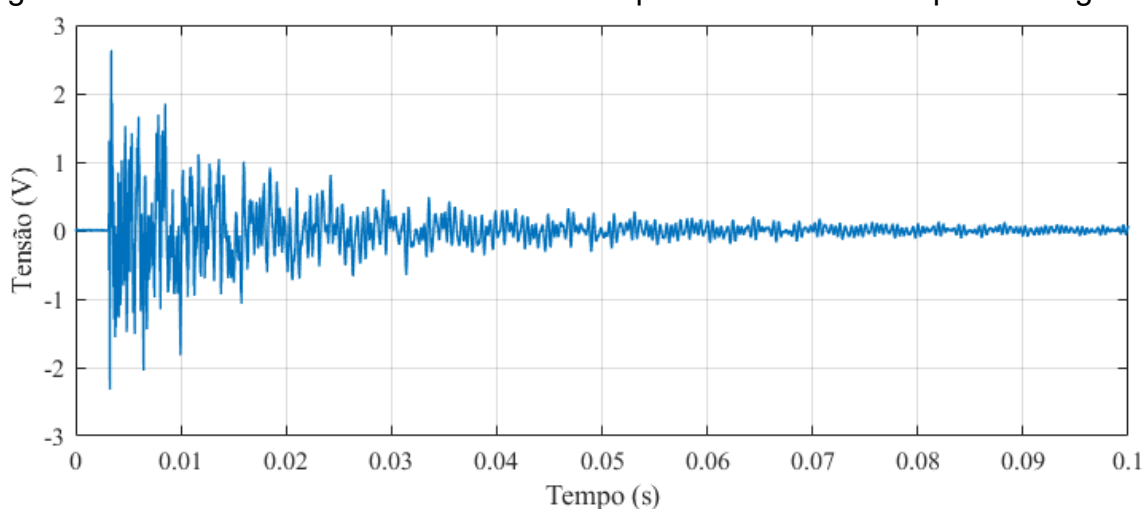
Como pode ser observado na Figura 3, a presença do dano estrutural causa alterações no sinal recebido pelo sensor. Portanto, por meio da aquisição e análise dos sinais, é possível detectar o dano estrutural. Semelhantemente a como é feito para o método da impedância eletromecânica, a análise pode ser feita comparando-se dois sinais, sendo um deles adotado como referência. Quanto menor é o dano a ser detectado, melhor deve ser a qualidade dos sinais dos transdutores piezelétricos. Assim, torna-se importante analisar os efeitos da diafonia.

2.3 EMISSÃO ACÚSTICA

Ao contrário dos métodos da impedância eletromecânica e ondas guiadas que utilizam o transdutor piezelétrico não apenas como sensor, mas também como atuador para promover a excitação forçada da estrutura, no método da emissão acústica o transdutor é utilizado apenas na forma passiva como sensor. Nesse caso, a fonte de emissão acústica é o próprio evento adverso a ser detectado, tal como o impacto de um objeto estranho, geração de rachadura ou vazamento, delaminação, falha de elemento estrutural, corrosão e quebra de fibra em um material compósito (Hassan *et al.*, 2021). Em processos industriais, a emissão acústica tem sido reportada para o monitoramento da queima da superfície de peças durante a etapa de retificação (Shen *et al.*, 2022). No processo de retificação, a fonte de emissão acústica é a vibração devido ao atrito entre o rebolo de corte e a peça a ser retificada. Anomalias no processo causam alterações na vibração do rebolo que podem ser detectadas a partir da aquisição e processamento dos sinais dos sensores.

Em laboratório, é comum a fonte de emissão acústica ser simulada pelo método conhecido como quebra do grafite, ou PLB do inglês *pencil-lead break*, procedimento adotado como um padrão e que consiste em quebrar um grafite contra a estrutura de interesse (ASTM, 2010). Com a ruptura do grafite, uma onda elástica impulsiva é gerada por toda a estrutura, podendo ser caracterizada com o sensor piezelétrico. Um sinal de emissão acústica gerado pelo método da quebra do grafite é apresentado na Figura 4.

Figura 4 – Sinal de emissão acústica obtido a partir do método da quebra do grafite



Fonte: Elaboração do próprio autor.

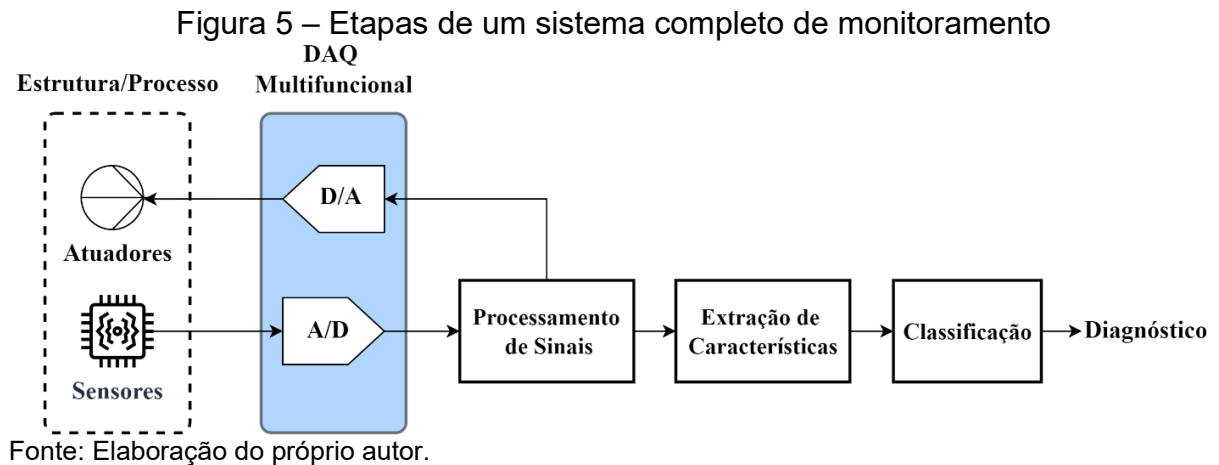
O processamento do sinal de emissão acústica normalmente é feito no domínio da frequência a partir de um estimador espectral. Muitas vezes, dependendo do evento de emissão acústica a ser monitorado, os sinais dos transdutores piezelétricos podem ser de baixa intensidade, o que torna a análise dos efeitos da diafonia importante para a detecção de pequenos danos estruturais.

Além da detecção de dano estrutural, é comum, nesse método, o emprego de técnicas de localização de danos, sendo muito baseadas no tempo de recebimento do sinal de emissão acústica pelos sensores instalados na estrutura monitorada (Hassan *et al.*, 2021). Um exemplo é a técnica de localização planar, que usa ao menos três sensores para localizar o dano a partir da diferença de tempo de recebimento dos sinais, triangulando sua posição. Dessa forma, como se usa diversos sensores amostrados simultaneamente, a diafonia também pode ser impeditiva na aplicação destas técnicas, podendo levar a tempos de recebimento dos sinais

incorretos. A diafonia em dispositivos de aquisição de dados e os métodos de mitigação utilizados neste trabalho são detalhados na próxima seção.

3 DIAFONIA EM DISPOSITIVOS DE AQUISIÇÃO DE DADOS

Com base no exposto nas seções anteriores, um sistema completo de monitoramento pode ser representado por várias etapas, como o diagrama simplificado apresentado na Figura 5.

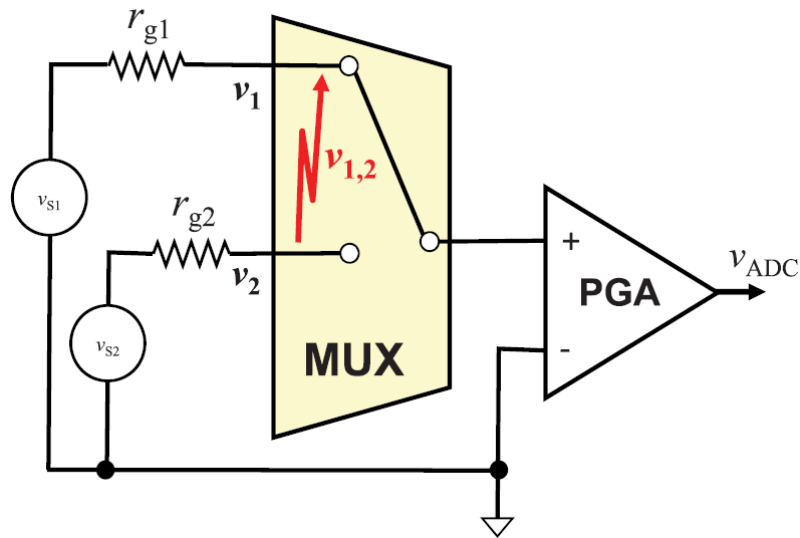


Na Figura 5, um dispositivo de aquisição de dados multifuncional gera o sinal de excitação dos atuadores instalados na estrutura por meio de conversores digital-analógico (D/A). A aquisição dos sinais dos sensores é realizada por conversores analógico-digital (A/D). Em seguida, os sinais passam por uma etapa de processamento de sinais que tem como função básica mitigar efeitos de distúrbios como ruído e variação de temperatura, além de formatar corretamente o sinal para a análise no domínio do tempo ou da frequência. Na etapa seguinte, são extraídas as características do sinal que permitam fazer a relação com o dano ou evento adverso a ser detectado. Muitas vezes, as etapas de processamento de sinais e extração de características se sobrepõem ou se complementam. Por fim, na última etapa é feita a classificação do tipo de dano, sua extensão e localização, permitindo o diagnóstico correto da estrutura ou do processo monitorado.

O interesse deste trabalho está em analisar a diafonia presente intrinsicamente em um dispositivo DAQ e seus efeitos na detecção de dano estrutural com os métodos não destrutivos abordados nas seções anteriores, atuando na etapa de aquisição dos sinais mencionada anteriormente. A diafonia é a interferência eletromagnética entre os canais de um dispositivo DAQ causada devido ao isolamento imperfeito entre eles. Esse efeito é particularmente crítico em dispositivos DAQ com canais multiplexados,

devido primariamente a capacitâncias parasitas entre as entradas do multiplexador, que acoplam sinais de canais não selecionados à saída. Além disso, a velocidade de multiplexação interfere na intensidade dos sinais armazenados nessas capacitâncias, especialmente quando o sinal do canal anterior tem maior amplitude que o sinal do canal atual (Witzel, 2005). A diafonia entre dois canais de um dispositivo DAQ multiplexado pode ser vista na Figura 6.

Figura 6 – Diafonia (*crosstalk*) entre dois canais de um dispositivo DAQ



Fonte: Atzori *et al.* (2021).

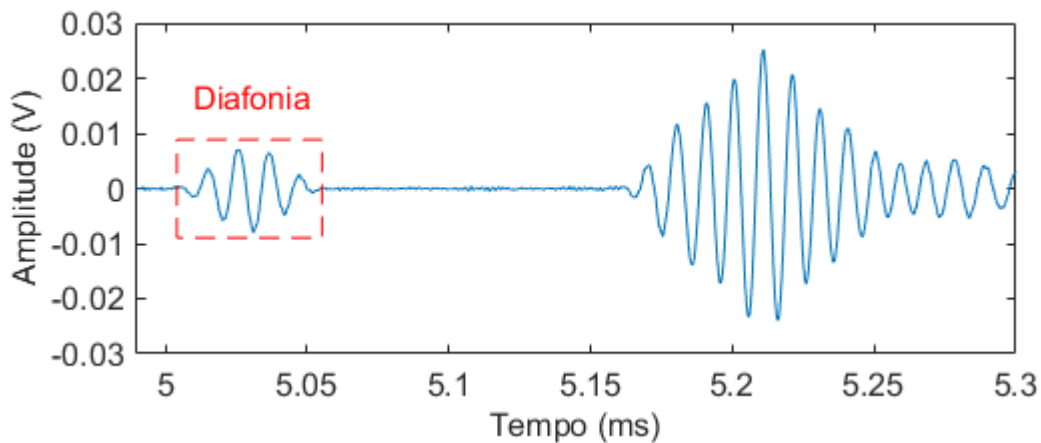
Na Figura 6, duas fontes V_{S1} e V_{S2} com resistências r_{g1} e r_{g2} , que, na prática, podem ser dois transdutores piezelétricos, são conectadas a dois canais de um multiplexador (MUX) de um dispositivo DAQ, sendo obtidas as tensões v_1 e v_2 em suas entradas. O DAQ do exemplo utiliza um amplificador tipo PGA (*programmable gain amplifier* – amplificador de ganho programável), muito comum nos dispositivos DAQ comerciais. A interferência entre os dois canais é ilustrada na figura por $v_{1,2}$, sendo o valor eficaz (rms) da interferência do canal 2, com tensão eficaz v_2 , no canal 1. Essa interferência ou *crosstalk* (CT) entre os canais afeta a incerteza das medições e, em princípio, pode ser quantificada como definido por Atzori *et al.* (2021):

$$CT = 20 \log \left(\frac{v_{1,2}}{v_2} \right) \quad (3)$$

Em sistemas de monitoramento de integridade estrutural, dependendo da configuração, a diafonia pode ser significativa e já tem sido reportada na literatura

(Lambinet; Khodaei, 2022; Fu; Sharif-Khodaei; Aliabadi, 2019; Qiu; Yuan, 2009). Contudo, esses estudos são poucos e são focados na diafonia causada pelos canais de excitação nos canais de medição, especialmente em sistemas de SHM baseados em métodos de ondas guiadas. Esse tipo de diafonia é causado pela alta amplitude dos sinais de excitação gerados, que tende a ser muito maior que a amplitude dos sinais de resposta dos sensores. Como exemplo, a Figura 7 mostra o sinal de resposta de um transdutor piezoelétrico em um sistema de SHM baseado no método de ondas de Lamb, que foi obtido experimentalmente no estudo atual. O sinal de excitação foi um sinal do tipo *burst* de 5 ciclos modulado por uma janela de Hanning com amplitude de 50 Vpp e frequência de 90 kHz, com distância entre atuador e sensor de 420 mm.

Figura 7 – Exemplo de diafonia causada por um sinal de excitação do tipo *burst* em um sistema de SHM baseado no método de ondas de Lamb



Fonte: Elaboração do próprio autor.

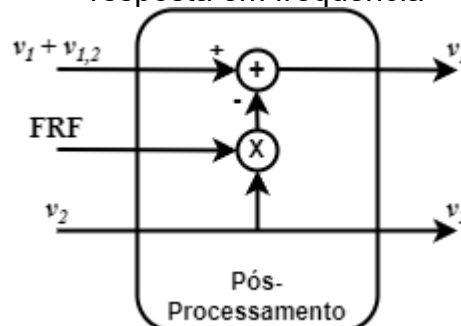
Como pode ser visto na Figura 7, o efeito da diafonia de um canal de excitação em um canal de medição de um dispositivo DAQ não é particularmente crítico, visto que pode ser facilmente identificado, na maior parte dos casos, pela diferença de tempo entre a excitação do atuador e o recebimento da onda por parte do sensor. Contudo, os efeitos da diafonia entre os canais de medição de um dispositivo DAQ aplicado a um sistema de SHM baseado em transdutores piezoelétricos podem não ser facilmente observados e podem afetar a acurácia das medições, necessitando serem estudados.

Os métodos de mitigação dos efeitos da diafonia aplicados neste estudo são apresentados na próxima seção.

3.1 MÉTODOS DE MITIGAÇÃO DOS EFEITOS DA DIAFONIA

De modo a minimizar os efeitos da diafonia e assegurar a precisão das medições, métodos de mitigação foram propostos na literatura. Em estudos recentes, Atzori *et al.* (2021) propôs um método de mitigação que consiste primeiramente na caracterização dos efeitos de diafonia causados por um canal de medição agressor (o canal que causa a interferência é conhecido como agressor) em um canal de medição perturbado, obtendo uma função de transferência entre o sinal medido e a interferência para a frequência de interesse. Em seguida, essa caracterização é usada para pós-processar o sinal no canal perturbado adicionando a ele o inverso do sinal amostrado no canal agressor multiplicado pela função de transferência obtida, corrigindo assim os efeitos de diafonia. Esse método é bastante eficaz para diafonia causada por sinais senoidais de frequência única. Em um caso em que os sinais de excitação e resposta contêm múltiplas frequências, como no método da impedância eletromecânica, a caracterização pode ser feita obtendo-se a FRF da interferência em relação ao sinal amostrado no canal agressor. Esse método de mitigação é analisado neste trabalho principalmente para aplicação em sistemas de SHM baseados em dispositivos DAQ e no método da impedância eletromecânica. Isso é possível dado o aumento linear da frequência dos sinais *chirp* usados como sinais de excitação nesse método, que geram, conseqüentemente, um aumento linear da frequência dos sinais de resposta dos transdutores piezelétricos. De forma a tornar a explicação mais clara, encontra-se, na Figura 8, um diagrama simplificado ilustrando o método de compensação descrito.

Figura 8 – Diagrama do método de mitigação dos efeitos da diafonia por função de resposta em frequência

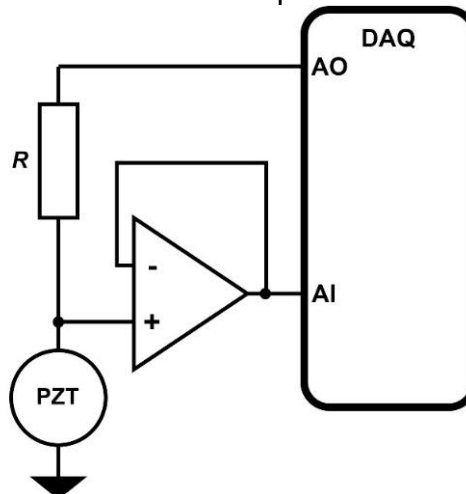


Fonte: Elaboração do próprio autor.

Na Figura 8, v_1 representa o valor eficaz do sinal amostrado no canal 1 de um dispositivo de aquisição de dados, $v_{1,2}$ representa o valor eficaz da diafonia causada pelo canal 2 no canal 1, v_2 representa o valor eficaz do sinal amostrado no canal 2, e FRF denota a função de resposta em frequência de caracterização da diafonia obtida previamente.

Existem outros métodos para mitigar os efeitos da diafonia, como o desenvolvimento de placas de circuito impresso multicamadas (PCB). Separar os canais de atuação e detecção em diferentes camadas do PCB ou desabilitar um canal específico quando não estiver em uso pode minimizar a diafonia (Fu; Sharif-Khodaei; Aliabadi, 2019). Essas soluções se aplicam a pesquisadores interessados em desenvolver suas próprias PCBs. Para dispositivos DAQ comerciais, o uso de amplificadores operacionais como seguidores de tensão é recomendado pelos fabricantes para conectar cargas de alta impedância, como é o caso dos transdutores piezoelétricos (National Instruments, 2019). Os seguidores de tensão têm alta impedância de entrada para acoplamento a transdutores piezoelétricos e baixa impedância de saída para conexão aos canais de medição de dispositivos DAQ. Portanto, o uso de seguidores de tensão em plataformas de medição baseadas em DAQ pode reduzir o tempo de estabilização e os efeitos da diafonia (Svensson *et al.*, 2024). Esse método foi avaliado neste estudo para mitigar os efeitos da diafonia principalmente no método da impedância eletromecânica, conforme mostrado na Figura 9.

Figura 9 – Diagrama do método de mitigação dos efeitos da diafonia por seguidor de tensão aplicado ao método da impedância eletromecânica



Fonte: Elaboração do próprio autor.

No sistema mostrado na Figura 9, a medição da impedância do transdutor é baseada no divisor de tensão entre o transdutor PZT e o resistor R, conforme relatado em outros estudos (da Silva; Budoya; Baptista, 2024; Alazzawi; Wang, 2024). O sinal de excitação é gerado pela saída analógica (AO) e o sinal de resposta do transdutor é amostrado pela entrada analógica (AI). A modificação em relação aos estudos anteriores é a inclusão do amplificador operacional como um seguidor de tensão entre o transdutor e a entrada analógica. Como o amplificador operacional tem baixa impedância de saída, a impedância vista pela entrada analógica é mantida baixa, mesmo que a impedância do transdutor seja alta. Espera-se que essa configuração mitigue a diafonia entre canais de medição adjacentes de um dispositivo DAQ.

A seguir, na Seção 4, são apresentadas a metodologia e os materiais utilizados nos experimentos realizados para este trabalho.

4 MATERIAL E MÉTODO

De modo a melhor organizar e facilitar a leitura e verificação dos resultados, esta seção está dividida em subseções, uma para cada experimento realizado. A Seção 5 está dividida da mesma maneira.

As descrições dos experimentos realizados para este trabalho estão apresentadas a seguir.

4.1 EXPERIMENTO 1 – EFEITOS DA DIAFONIA EM DISPOSITIVOS DE AQUISIÇÃO DE DADOS

De modo a verificar os efeitos da diafonia em diferentes equipamentos, três dispositivos de aquisição de dados comerciais disponíveis foram empregados nesta etapa, sendo eles: NI USB-6361, NI USB-6366 e plataforma PXI NI PXIe-1071, equipada com um gerador de formas de onda NI PXIe-5413 e com uma placa de osciloscópio de alta densidade NI PXIe-5105. Suas características relevantes a este trabalho estão sumarizadas na Tabela 1, a seguir.

Tabela 1 – Características dos dispositivos DAQ utilizados

Dispositivo	Canais analógicos de entrada	Canais analógicos de saída	Arquitetura dos canais de entrada	Taxa de amostragem máxima
NI USB-6361	16	2	Multiplexados	1 MHz*
NI USB-6366	8	2	Individuais	2 MHz
NI PXIe-1071	8	2	Individuais	60 MHz

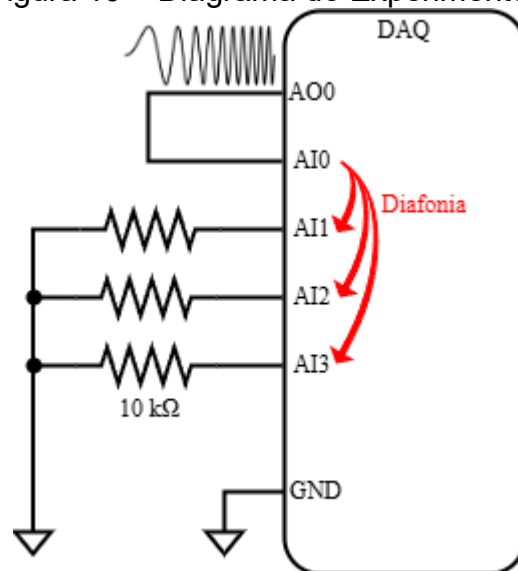
*Como o dispositivo é multiplexado, essa taxa de amostragem deve ser dividida entre os canais utilizados

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Para verificar os efeitos da diafonia no dispositivo NI USB-6361, um sinal do tipo *chirp* com amplitude de 10 V e frequências inicial e final de 0 Hz e 125 kHz, respectivamente, foi gerado no canal analógico de saída AO0 do dispositivo. Este sinal foi amostrado diretamente no canal analógico de entrada AI0. Os três próximos canais de entrada, sendo eles AI1, AI2 e AI3, foram aterrados por um resistor de 10 kΩ e amostrados simultaneamente ao canal AI0, de modo a obter-se efeitos da diafonia nesses canais. O número de amostras obtidas em cada canal foi 125 mil, a uma taxa de amostragem de 250 kS/s, a máxima taxa permitida usando-se quatro canais de

medição. A configuração de entrada de medição utilizada foi RSE (*referenced single-ended*). Essa configuração foi escolhida, em detrimento de uma diferencial, também permitida no dispositivo, por ser o pior caso de diafonia possível a ser mitigado em testes subsequentes, além de, em casos de monitoramento, permitir a conexão do maior número possível de transdutores, visto que a configuração diferencial usa duas entradas por sensor. A Figura 10, abaixo, mostra o diagrama esquemático usado nesta etapa.

Figura 10 – Diagrama do Experimento 1



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Procedimentos análogos foram empregados para os outros dois dispositivos, apenas mudando-se os parâmetros usados. Para o NI USB-6366, o sinal *chirp* foi gerado com faixa de frequência de 0 Hz a 1 MHz, no canal analógico de saída AO0. Os canais amostrados foram os mesmos do dispositivo anterior, seguindo as mesmas conexões. O número de amostras obtidas em cada canal foi 1 milhão, a uma taxa de amostragem de 2 MS/s. A configuração de entrada de medição utilizada foi diferencial (DIFF – *differential*), a única permitida no dispositivo.

Para o NI PXIe-1071, o sinal *chirp* foi gerado com faixa de frequência de 0 Hz a 5 MHz, no canal analógico de saída CH0 do módulo PXIe-5413. Os canais amostrados foram CH0, CH1, CH2 e CH3, do módulo PXIe-5105, seguindo as mesmas conexões dos procedimentos para os outros dispositivos. O número de amostras obtidas em cada canal foi 5 milhões, a uma taxa de amostragem de 10 MS/s.

A configuração de entrada de medição utilizada foi diferencial, a única permitida no dispositivo.

Para quantificar os efeitos da diafonia, as densidades espectrais de potência (PSD – *power spectral density*) dos sinais amostrados em todos os canais dos três dispositivos foram obtidas.

Todas as medições e geração de sinais realizadas neste experimento foram feitas através de VIs (*Virtual Instruments* – Instrumentos Virtuais) desenvolvidos em LabVIEW, com os dispositivos de aquisição de dados conectados a um computador, e a uma temperatura controlada de 24 °C, garantida por aparelho de ar-condicionado. A obtenção das densidades espectrais de potência foi feita juntamente às medições, nos mesmos VIs.

4.2 EXPERIMENTO 2 – EFEITOS DA TAXA DE AMOSTRAGEM E DA IMPEDÂNCIA DE CARGA NA DIAFONIA

A partir desta etapa, optou-se por utilizar apenas o dispositivo de aquisição de dados NI USB-6361, visto que ele apresentou os efeitos de diafonia mais significativos, como pode ser visto na Seção 5.1 deste trabalho. A montagem experimental usada nesta etapa é similar àquela mostrada anteriormente na Figura 10, empregando-se apenas duas entradas analógicas e alterando-se o valor da resistência usada. Para verificar os efeitos da taxa de amostragem na diafonia, um sinal senoidal com amplitude de 10 V, frequência de 500 Hz e 20 ciclos foi gerado no canal analógico de saída AO0 e amostrado diretamente no canal analógico de entrada AI0. O canal AI1 foi amostrado simultaneamente, conectado à terra através de um resistor. Este procedimento foi realizado para cada valor de taxa de amostragem empregado, sendo estes variados de 10 kS/s a 500 kS/s, com passos de 10 kS/s.

Resistores de diferentes valores foram conectados ao canal AI1, e o procedimento descrito foi realizado para cada um. Os resistores empregados foram de 10 Ω , 100 Ω , 1 k Ω , 10 k Ω , 100 k Ω , 1 M Ω e 10 M Ω .

A diafonia no canal AI1 foi quantificada para cada valor de taxa de amostragem segundo a equação (3), e um gráfico, para cada valor de resistência, foi obtido usando-se os valores calculados.

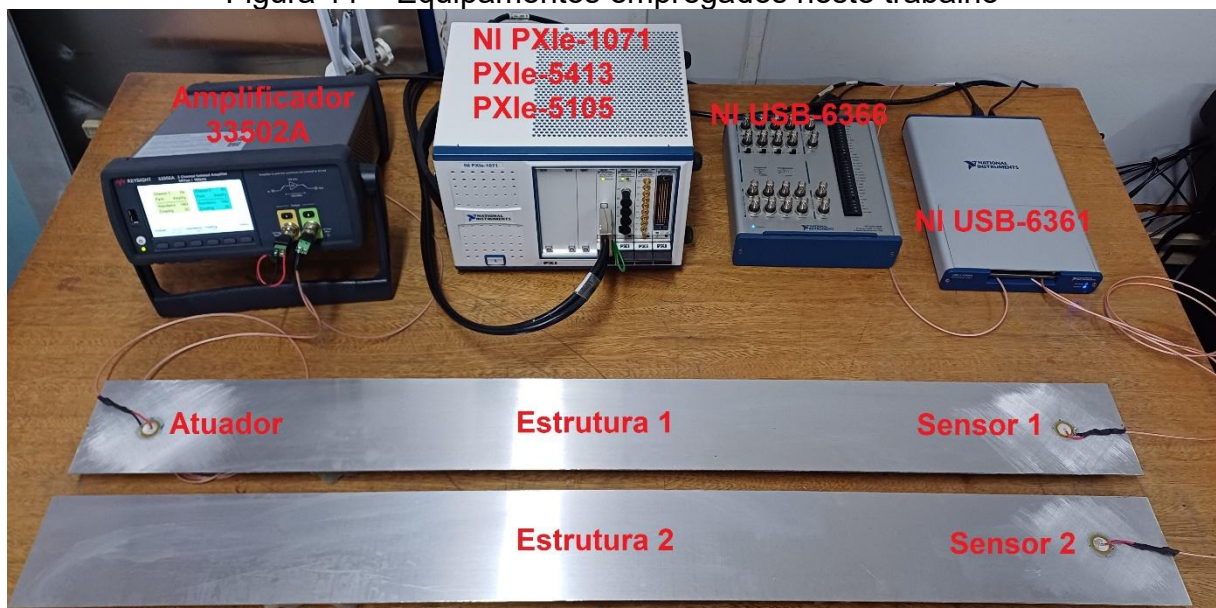
As medições e geração de sinais realizadas nesta etapa foram feitas através de VI desenvolvido em LabVIEW, com o dispositivo NI USB-6361 conectado a um

computador, e a uma temperatura controlada de 24 °C, garantida por aparelho de ar-condicionado.

4.3 EXPERIMENTO 3 – EFEITOS DA DIAFONIA NO MÉTODO DE ONDAS GUIADAS

A partir deste experimento, duas placas de alumínio foram empregadas como estruturas a serem monitoradas. Uma das placas foi denominada Estrutura 1 e, a outra, Estrutura 2. Na Estrutura 1, dois diafragmas piezelétricos foram fixados, usando-se adesivo a base de cianoacrilato, de forma que ficassem a 6 cm das bordas e no eixo central da placa, a uma distância de 88 cm entre eles. Um dos diafragmas foi denominado Atuador, e, o outro, Sensor 1. Na Estrutura 2, foi fixado um diafragma de modo que ficasse a 6 cm da borda e no eixo central da placa, sendo denominado Sensor 2. As placas foram apoiadas usando-se blocos de espuma, de modo a isolá-las de vibrações externas. Duas estruturas distintas foram empregadas para garantir que interferências causadas em medições sejam devidas aos efeitos da diafonia. As placas de alumínio, bem como outros equipamentos utilizados neste trabalho, podem ser vistas abaixo, na Figura 11.

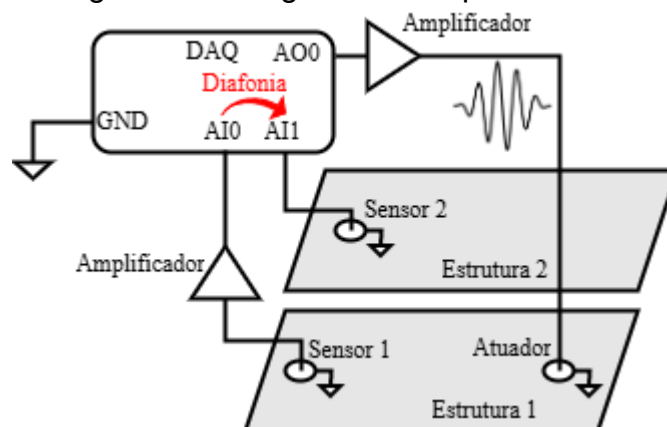
Figura 11 – Equipamentos empregados neste trabalho



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Para verificar os efeitos da diafonia no método das ondas guiadas, um sinal de excitação foi gerado no canal analógico de saída AO0 do dispositivo NI USB-6361, amplificado em 5 vezes através de um amplificador de tensão comercial KEYSIGHT 33502A e enviado ao Atuador na Estrutura 1. O sinal de resposta obtido no Sensor 1 foi amostrado no canal analógico de entrada AI0. Simultaneamente, o Sensor 2 foi amostrado no canal AI1, estando a Estrutura 2 fisicamente separada da Estrutura 1. A Figura 12, abaixo, mostra o diagrama esquemático usado nesta etapa.

Figura 12 – Diagrama do Experimento 3



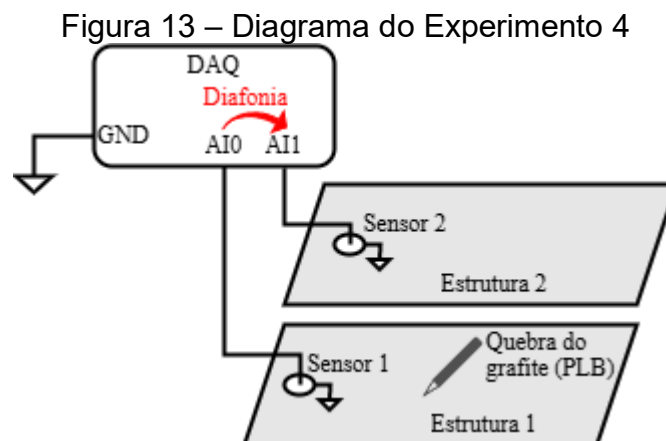
Fonte: Elaboração do próprio autor.

De forma a possibilitar comparação dos resultados obtidos a uma situação sem efeitos da diafonia, o Sensor 2 foi, também, amostrado individualmente no canal AI1, estando o canal AI0 aterrado.

As medições e geração de sinais realizadas nesta etapa foram feitas através de VI desenvolvido em LabVIEW, com o dispositivo NI USB-6361 conectado a um computador. O sinal de excitação usado foi um sinal do tipo *burst* com amplitude de 4,9 V, frequência de 50 kHz e 5 ciclos. A amplitude do sinal de excitação foi escolhida de forma a não saturar o amplificador, resultando em um sinal, após amplificação, de 49 Vpp, abaixo do limite de 50 Vpp do equipamento. Da mesma forma, a frequência do sinal foi escolhida de modo a ficar dentro do limite do equipamento, de, no máximo, 100 kHz. O número de amostras obtidas por canal de medição foi 50 mil, a uma taxa de amostragem de 500 kS/s, sendo o envio do sinal de excitação atrasado em 10 mil amostras. As medições foram feitas a uma temperatura controlada de 22 °C, garantida por aparelho de ar-condicionado.

4.4 EXPERIMENTO 4 – EFEITOS DA DIAFONIA NO MÉTODO DE EMISSÃO ACÚSTICA

As duas placas foram usadas como estruturas a serem monitoradas nesta etapa, de forma a garantir que interferências causadas em medições sejam devidas aos efeitos da diafonia. Para verificar os efeitos da diafonia no método da emissão acústica, os sensores 1 e 2 foram amostrados simultaneamente nos canais analógicos de entrada AI0 e AI1, respectivamente, do dispositivo NI USB-6361. O método da quebra do grafite foi empregado na Estrutura 1, a uma distância de 10 cm do Sensor 1, estando a Estrutura 2 fisicamente separada. De modo a garantir a confiabilidade dos resultados, quatro medições foram realizadas seguindo este procedimento. A Figura 13, abaixo, mostra o diagrama esquemático usado nesta etapa.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

As medições realizadas nesta etapa foram feitas através de VI desenvolvido em LabVIEW, com o dispositivo NI USB-6361 conectado a um computador. O número de amostras obtidas por canal de medição foi 500 mil, a uma taxa de amostragem de 500 kS/s. As medições foram feitas a uma temperatura controlada de 24 °C, garantida por aparelho de ar-condicionado.

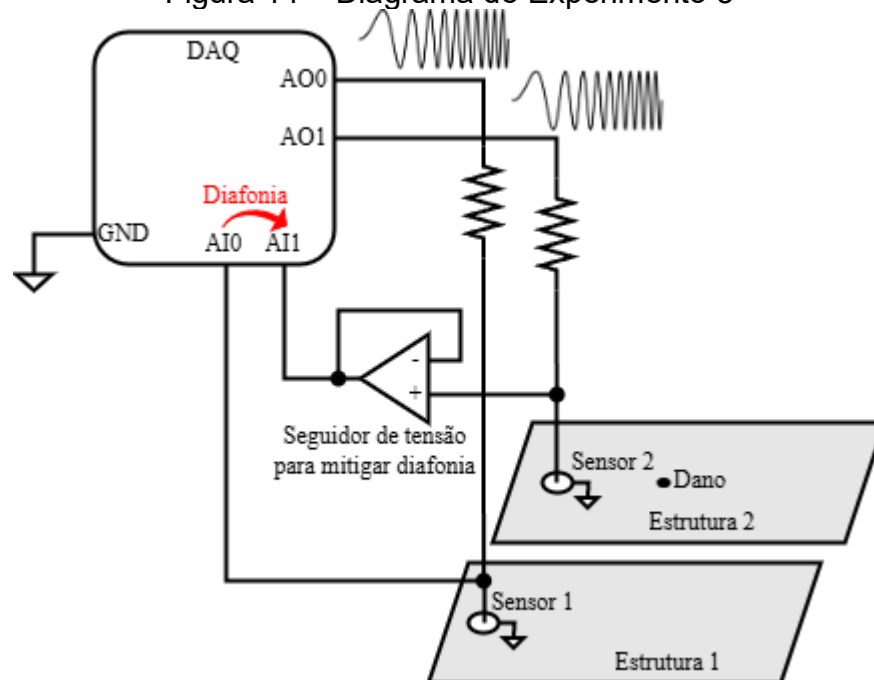
4.5 EXPERIMENTO 5 – EFEITOS DA DIAFONIA NO MÉTODO DA IMPEDÂNCIA ELETROMECHANICA

Ambas as estruturas foram utilizadas nesta etapa, a fim de garantir que interferências causadas em medições sejam decorrentes dos efeitos da diafonia. Para

a verificação dos efeitos da diafonia no método da impedância eletromecânica, primeiramente, a curva da impedância elétrica do Sensor 2 foi obtida individualmente através do canal analógico de entrada AI1 do dispositivo NI USB-6361, estando o canal AI0 aterrado e sem danos na Estrutura 2, para ser usada de referência. Na sequência, as curvas da impedância elétrica dos sensores 1 e 2 foram obtidas simultaneamente através dos canais AI0 e AI1, respectivamente, de forma a causar efeitos da diafonia na curva do Sensor 2.

Para comparação com os resultados obtidos sob o efeito da diafonia, um dano pequeno foi simulado à Estrutura 2, fixando a ela uma porca de aço de 6 mm, usando-se o adesivo a base de cianoacrilato, a uma distância de 7 cm do Sensor 2. Uma nova curva de impedância foi, então, obtida para o Sensor 2 individualmente pelo canal AI1, estando o canal AI0 aterrado, de modo a se obter apenas o efeito do dano na impedância elétrica do transdutor, sem diafonia. A Figura 14, abaixo, mostra o diagrama esquemático usado nesta etapa. O seguidor de tensão presente na imagem, contudo, não foi empregado neste experimento, sendo o sinal de resposta do Sensor 2 obtido diretamente no canal AI1.

Figura 14 – Diagrama do Experimento 5



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Em seguida, o índice de dano RMSD foi calculado a partir das curvas de impedância obtidas, tanto para os efeitos da diafonia quanto para a situação com dano estrutural simulado, em relação à curva de referência.

As medições e geração de sinais realizadas nesta etapa foram feitas através do sistema de medição de impedância desenvolvido no LabVIEW por Baptista e Vieira Filho (2009), com o dispositivo NI USB-6361 conectado a um computador. O sinal de excitação usado foi um sinal do tipo *chirp* com amplitude de 5 V e faixa de frequência de 0 Hz a 100 kHz. O número de amostras obtidas por canal de medição foi 500 mil, a uma taxa de amostragem de 500 kS/s. Resistores de 3,3 k Ω foram empregados em série com os transdutores. As medições foram feitas a uma temperatura controlada de 24 °C, garantida por aparelho de ar-condicionado. Os cálculos do índice RMSD foram feitos para a faixa de frequência de 30 kHz a 50 kHz, considerando-se sub-faixas de frequência de 1 kHz. Essa faixa de frequência foi escolhida de forma a estar acima das frequências audíveis e ser, ao menos, 10 vezes menor que a taxa de amostragem empregada.

4.6 EXPERIMENTO 6 – MITIGAÇÃO DOS EFEITOS DA DIAFONIA

Nesta etapa do trabalho, os métodos de mitigação apresentados anteriormente foram aplicados aos sistemas de SHM utilizados, com destaque ao sistema baseado no método da impedância eletromecânica.

Primeiramente, o método de compensação baseado na caracterização da diafonia por função de resposta em frequência foi testado em aplicação ao método da impedância eletromecânica. Inicialmente, na etapa de caracterização da diafonia, um sinal de excitação do tipo *chirp* com amplitude de 5 V e faixa de frequência de 0 Hz a 100 kHz foi aplicado ao Sensor 1, e seu sinal de resposta foi amostrado no canal analógico de entrada AI0. Simultaneamente, o canal de entrada AI1 foi amostrado, estando conectado ao Sensor 2. A função de resposta em frequência do sinal amostrado no canal AI1 foi obtida, então, em relação ao sinal amostrado no canal AI0. Em seguida, o mesmo sinal de excitação foi aplicado simultaneamente a ambos os transdutores, sendo o sinal de resposta do Sensor 1 amostrado no canal AI0 e o sinal de resposta do Sensor 2 amostrado no canal AI1. Antes da obtenção das curvas de impedância dos transdutores, o sinal de resposta do Sensor 1 foi invertido e multiplicado pela função de caracterização obtida previamente, e, então, somado ao

signal de resposta do Sensor 2. As curvas das impedâncias elétricas dos transdutores foram, então, obtidas.

Para comparação dos resultados obtidos a situações em que a medição da impedância elétrica do Sensor 2 está sem e sob efeitos de diafonia, novas curvas de impedância de referência e sob efeito da diafonia foram obtidas, seguindo o procedimento apresentado na Seção 4.5.

Na sequência, o índice de dano RMSD foi calculado a partir das curvas de impedância obtidas, tanto para os efeitos da diafonia quanto para os efeitos da diafonia compensados, em relação à curva de referência.

A seguir, o método de mitigação baseado no uso de seguidores de tensão foi avaliado para aplicação no método da impedância eletromecânica, usando-se um amplificador operacional CA3140EZ como um seguidor de tensão entre o Sensor 2 e o canal de entrada analógico AI1, conforme mostrado no diagrama da Figura 14. Do mesmo modo que para o método de mitigação anterior, um sinal de excitação do tipo *chirp* com amplitude de 5 V e faixa de frequência de 0 Hz a 100 kHz foi aplicado ao Sensor 1, e seu sinal de resposta foi amostrado no canal analógico de entrada AI0. Simultaneamente, o canal de entrada AI1 foi amostrado, estando conectado ao amplificador operacional, por sua vez conectado ao Sensor 2.

Novamente, novas curvas de impedância de referência e sob efeito da diafonia foram obtidas, seguindo o procedimento apresentado na Seção 4.5, para comparação dos resultados. O índice de dano RMSD foi calculado a partir das curvas de impedância obtidas, tanto para os efeitos da diafonia quanto para os efeitos da diafonia compensados, em relação à curva de referência.

Na sequência, ambos os métodos de mitigação foram aplicados, também, aos sistemas de SHM baseados nos métodos de ondas guiadas e emissão acústica, de modo a verificar suas eficácias nessas situações. Para ambos os métodos, procedimentos análogos aos já apresentados para o método da impedância eletromecânica foram realizados, com exceção do cálculo de índices de dano.

As medições e geração de sinais e obtenção de funções de resposta em frequência realizadas nesta etapa foram feitas através de VIs desenvolvidos em LabVIEW, com o dispositivo NI USB-6361 conectado a um computador. As medições para o método da impedância eletromecânica foram feitas usando o sistema de medição de impedância desenvolvido por Baptista e Vieira Filho (2009), com resistores de 3,3 k Ω foram empregados em série com os transdutores. Para os testes

com o método de ondas guiadas, o amplificador de tensão comercial KEYSIGHT 33502A foi utilizado da mesma maneira como descrito na Seção 4.3. O número de amostras obtidas por canal de medição foi 500 mil, a uma taxa de amostragem de 500 kS/s. As medições foram feitas a uma temperatura controlada de 24 °C, garantida por aparelho de ar-condicionado. Os cálculos do índice RMSD foram feitos para a faixa de frequência de 30 kHz a 50 kHz, considerando-se subfaixas de frequência de 1 kHz.

A seguir, na Seção 5, são apresentados todos os resultados obtidos para os experimentos descritos nesta seção.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

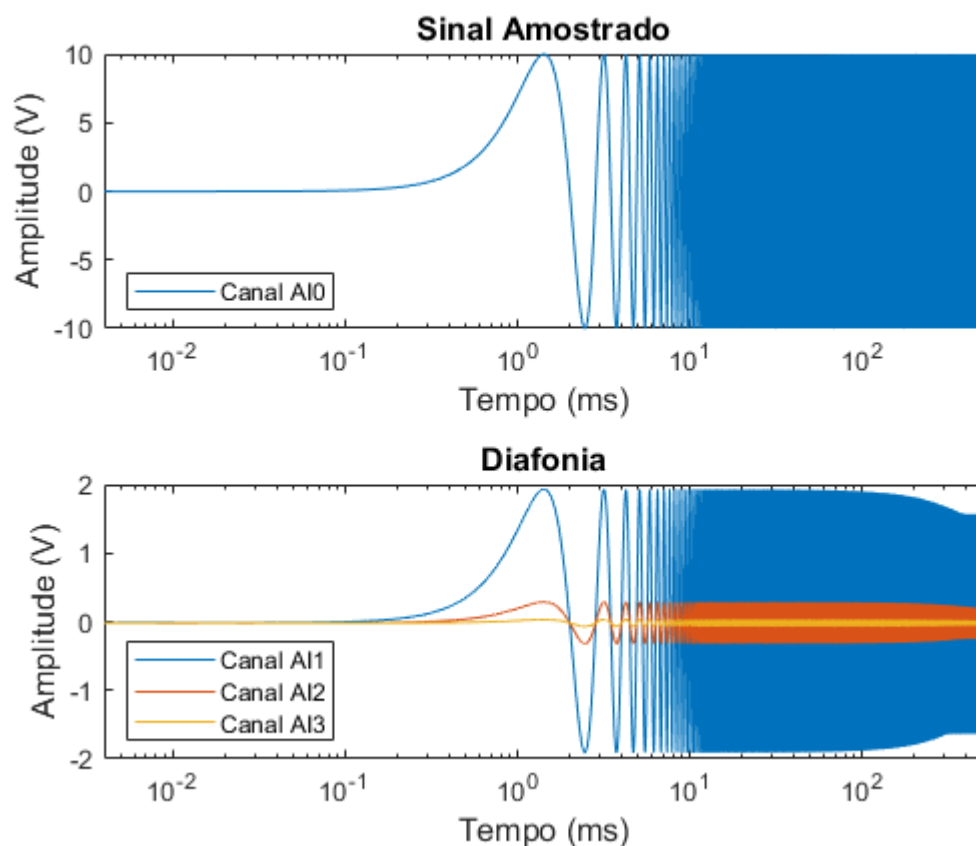
Como mencionado anteriormente, esta seção está dividida em subseções, uma para cada experimento realizado, da mesma maneira que a Seção 4.

Os resultados obtidos para todos os experimentos descritos na seção anterior estão apresentados e discutidos a seguir.

5.1 EXPERIMENTO 1 – EFEITOS DA DIAFONIA EM DISPOSITIVOS DE AQUISIÇÃO DE DADOS

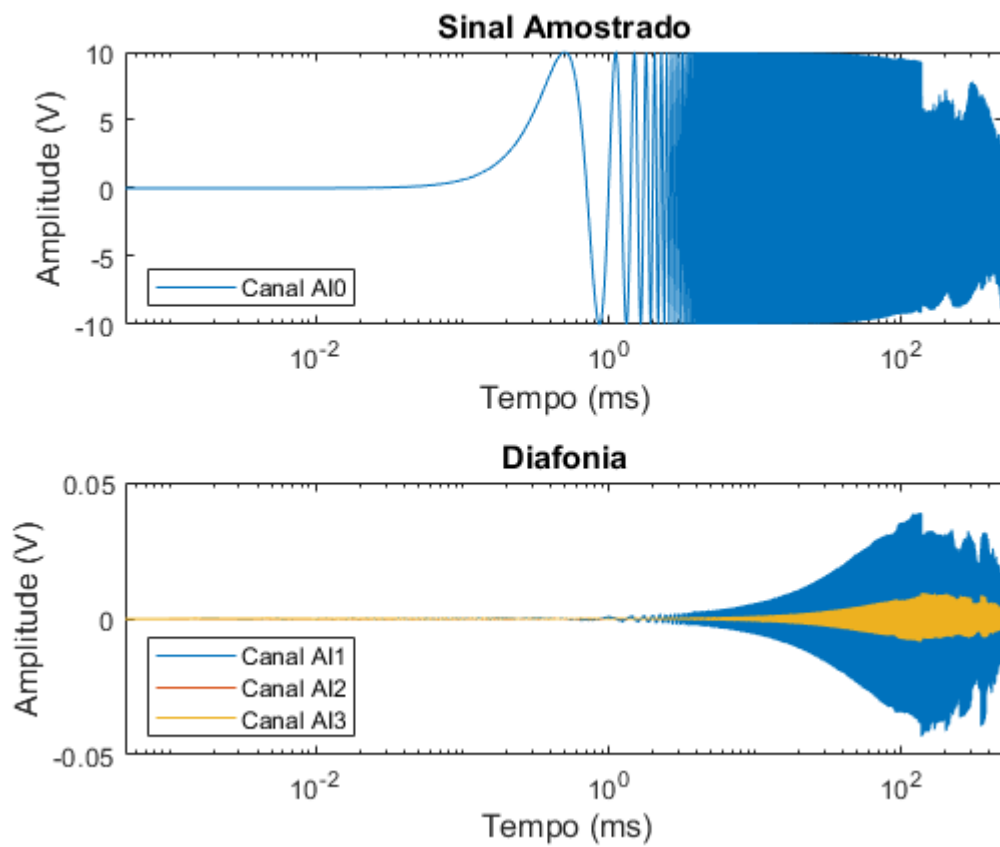
São apresentados, a seguir, os sinais amostrados no domínio do tempo nos quatro canais dos três dispositivos de aquisição de dados, nas Figuras 15, 16 e 17. Todas as figuras apresentadas nesta Seção 5 foram geradas através do software MATLAB.

Figura 15 – Sinais no tempo: Diafonia nos canais de medição adjacentes do dispositivo DAQ NI USB-6361



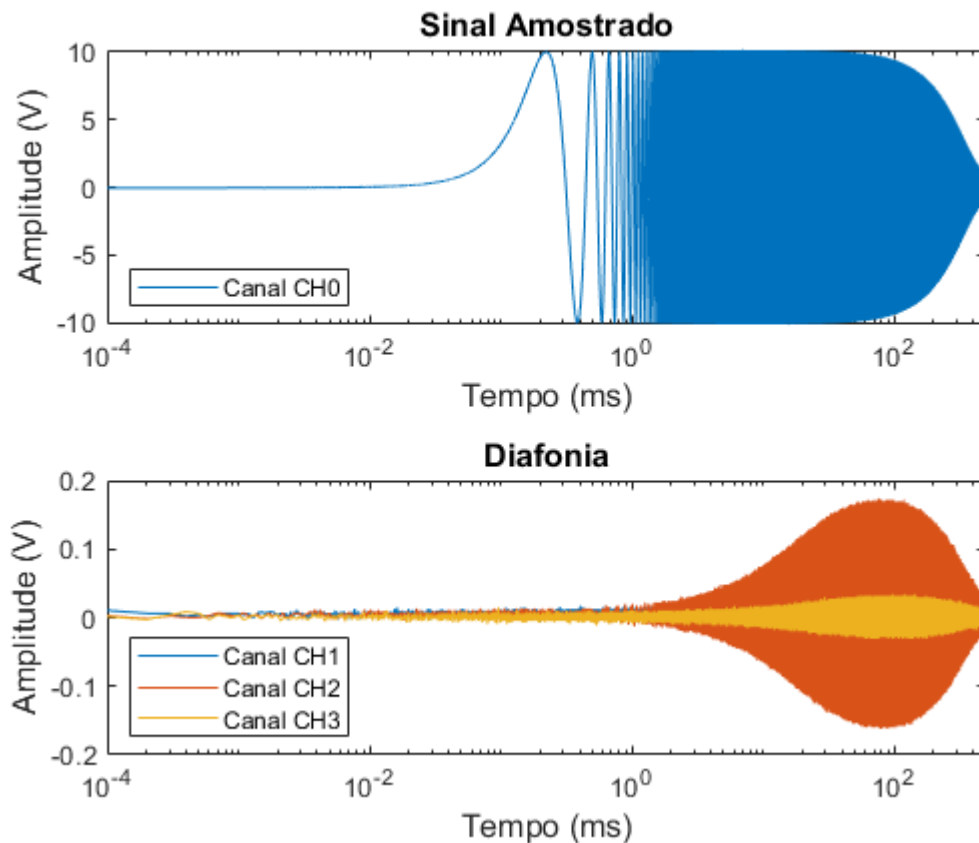
Fonte: Elaboração do próprio autor.

Figura 16 – Sinais no tempo: Diafonia nos canais de medição adjacentes do dispositivo DAQ NI USB-6366



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Figura 17 – Sinais no tempo: Diafonia nos canais de medição adjacentes do dispositivo DAQ NI PXIe-1071

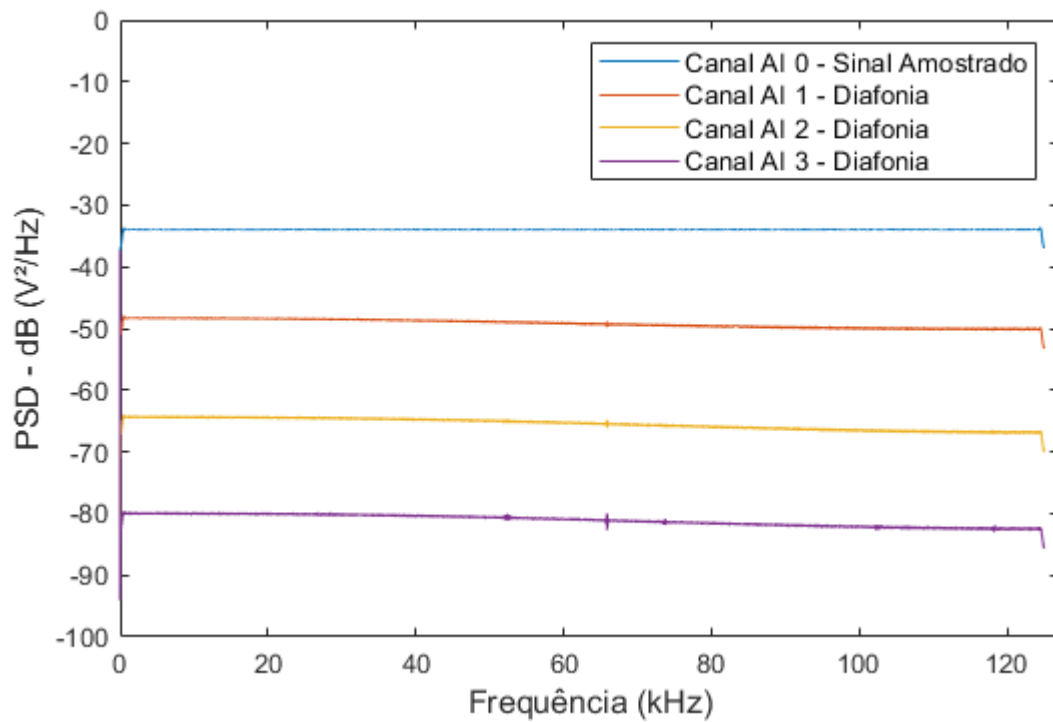


Fonte: Elaboração do próprio autor.

Como pode ser visto nas figuras acima, reflexos do sinal amostrado foram obtidos nos três canais adjacentes ao canal usado na medição do sinal devido ao efeito da diafonia entre os canais de medição, visto que estavam aterrados através de um resistor de 10 k Ω e, portanto, deveriam resultar em medições próximas a 0 V em toda a faixa de tempo amostrada.

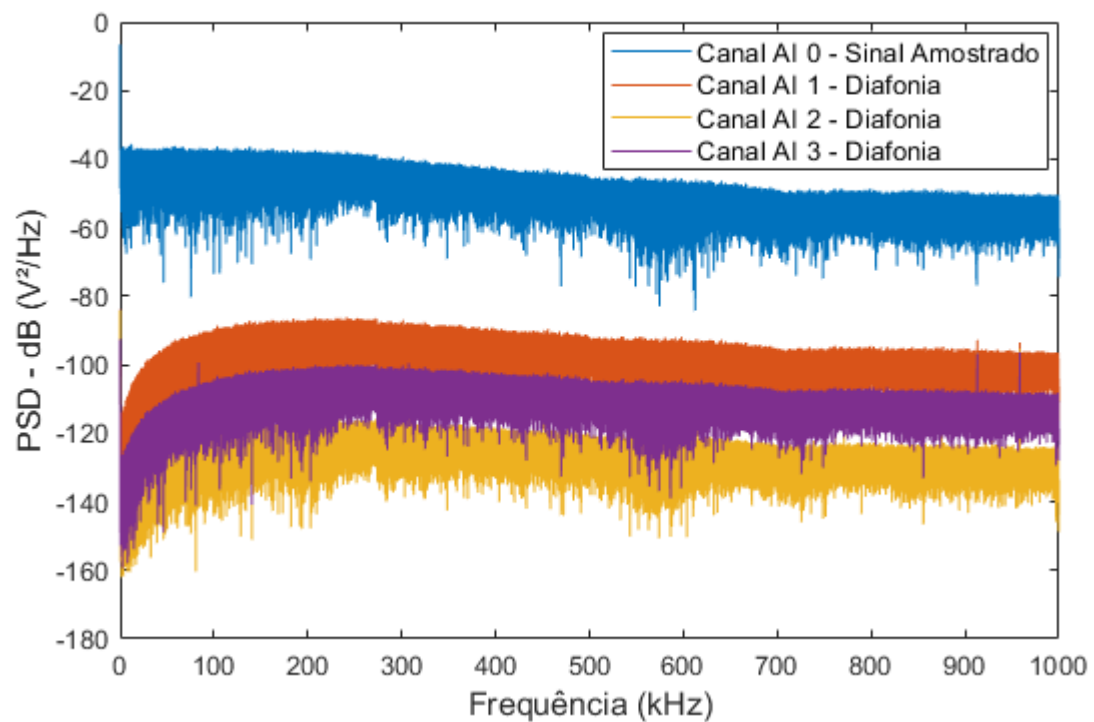
A seguir, nas Figuras 18, 19 e 20, são apresentadas as PSDs dos sinais amostrados nos quatro canais dos três dispositivos de aquisição de dados.

Figura 18 – Densidades espectrais de potência dos sinais amostrados no dispositivo DAQ NI USB-6361



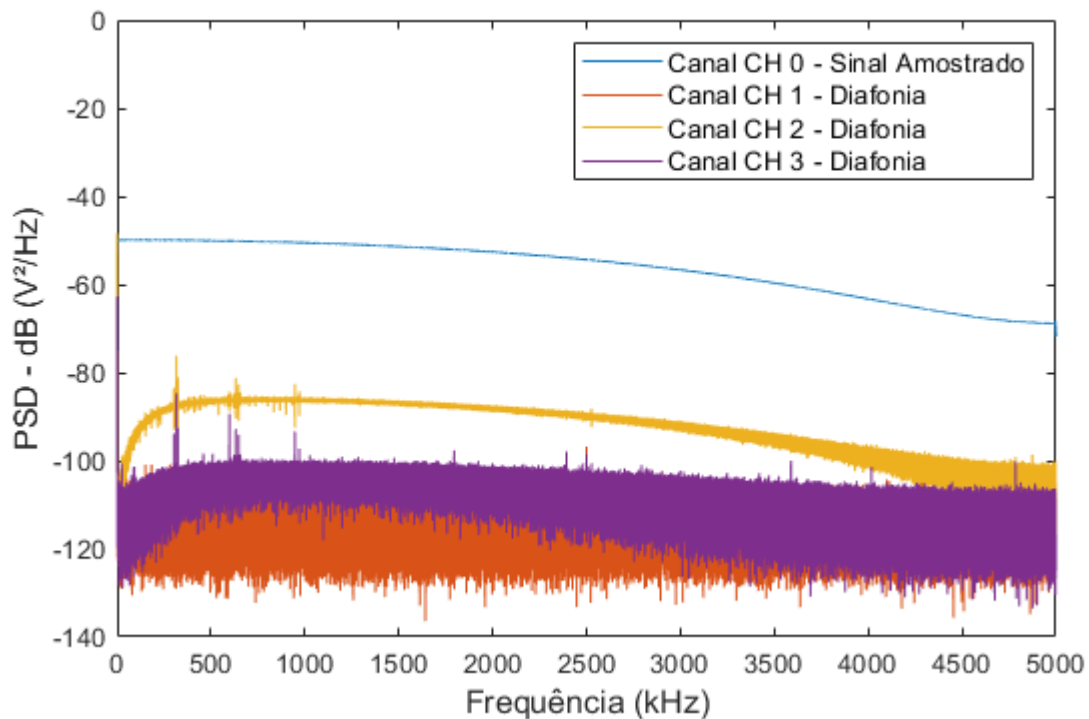
Fonte: Elaboração do próprio autor.

Figura 19 – Densidades espectrais de potência dos sinais amostrados no dispositivo DAQ NI USB-6366



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Figura 20 – Densidades espectrais de potência dos sinais amostrados no dispositivo DAQ NI PXIe-1071



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Ao observar as Figuras de 15 a 20, é possível afirmar que o dispositivo NI USB-6361 apresentou os efeitos de diafonia mais significativos, apresentando um sinal *chirp* com amplitude próxima a 2 V no canal adjacente ao canal de medição usado para amostrar o sinal gerado. Isso é claro ao observarmos as densidades espectrais de potência obtidas para os três equipamentos, visto que os dispositivos NI USB-6366 e NI PXIe-1071 apresentaram, no pior caso de diafonia, valores superiores, em módulo, a -80 dB em toda a faixa de frequência analisada, enquanto o dispositivo NI USB-6361 apresentou, no pior caso de diafonia, valores inferiores, em módulo, a -50 dB. Isso ocorre devido ao fato de o dispositivo NI USB-6361 ser o único, dentre os equipamentos utilizados, a apresentar canais de medição multiplexados. Efeitos da diafonia em dispositivos com essa configuração são mais graves devido à capacitância parasita entre as entradas do multiplexador.

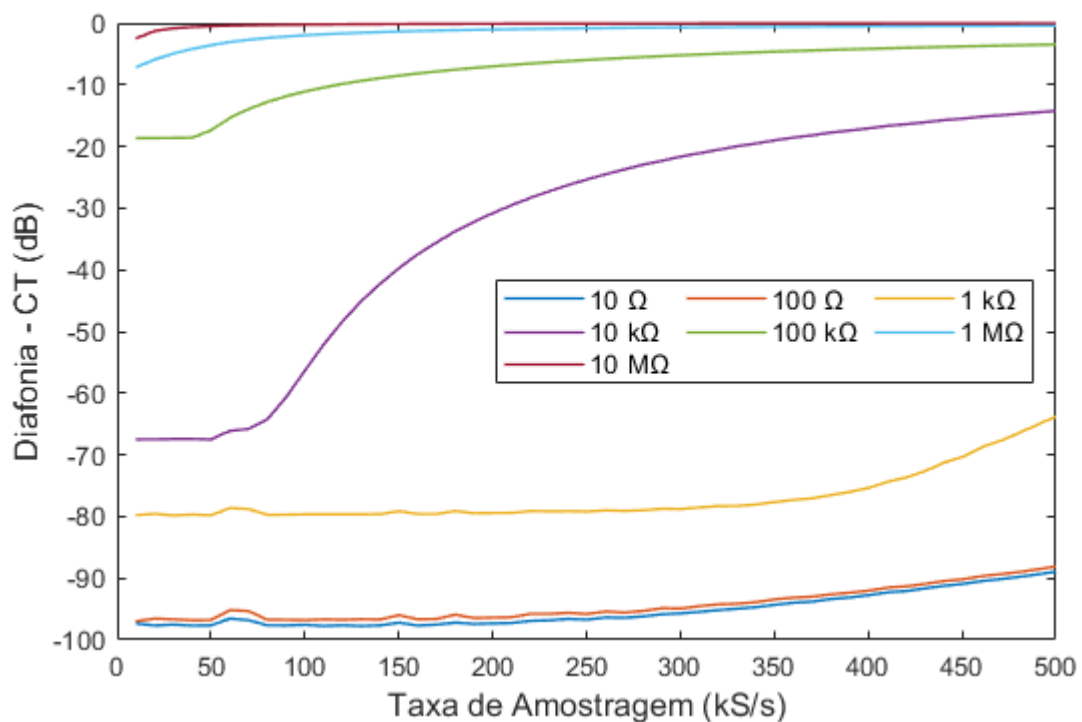
Também é possível afirmar, observando-se as Figuras 15 e 18, que os efeitos da diafonia diminuem, para o NI USB-6361, conforme os canais de medição se afastam do canal agressor, sendo mais graves no canal adjacente a este e menos significativos nos canais seguintes. Este efeito não ocorreu nos outros dispositivos, provavelmente devido a configurações internas de hardware dos canais de medição.

Como mencionado anteriormente, o dispositivo DAQ NI USB-6361 foi escolhido para ser utilizado nos experimentos subsequentes, visto que apresentou os efeitos da diafonia mais significativos.

5.2 EXPERIMENTO 2 – EFEITOS DA TAXA DE AMOSTRAGEM E DA IMPEDÂNCIA DE CARGA NA DIAFONIA

Na Figura 21, a seguir, são apresentados os gráficos obtidos para os valores calculados de diafonia variando-se a taxa de amostragem e a impedância de carga.

Figura 21 – Efeitos da taxa de amostragem e da impedância de carga na diafonia de um dispositivo de aquisição de dados



Fonte: Elaboração do próprio autor.

De acordo com os gráficos apresentados na Figura 21, quanto maior a taxa de amostragem utilizada, maiores são os efeitos da diafonia em um dispositivo de aquisição de dados. Tomando o gráfico para resistência de 10 kΩ, cujos valores apresentaram maior variação, como exemplo, os valores da diafonia aumentaram de, aproximadamente, -67,5 dB a uma taxa de amostragem de 10 kS/s para -14,24 dB a uma taxa de 500 kS/s. Isso ocorre devido à velocidade de multiplexação, como

mentionado na Seção 3, interferindo na carga e na descarga das capacitâncias parasitas presentes no multiplexador.

Também é possível afirmar, de acordo com os gráficos, que a diafonia depende do valor de impedância conectado ao canal de medição. Quanto maior a impedância de carga, maiores são os efeitos da diafonia. A uma taxa de amostragem de 500 kS/s, por exemplo, os valores da diafonia aumentaram de, aproximadamente, -63,78 dB com resistência de 1 k Ω para -14,24 dB com resistência de 10 k Ω . Pode-se verificar, também, que, para valores suficientemente altos de impedância, os valores de diafonia tornam-se especialmente críticos, chegando a praticamente copiar o sinal amostrado no canal agressor. Para uma resistência de 100 k Ω , por exemplo, o valor da diafonia a uma taxa de amostragem de 500 kS/s chega a, aproximadamente, -3,47 dB.

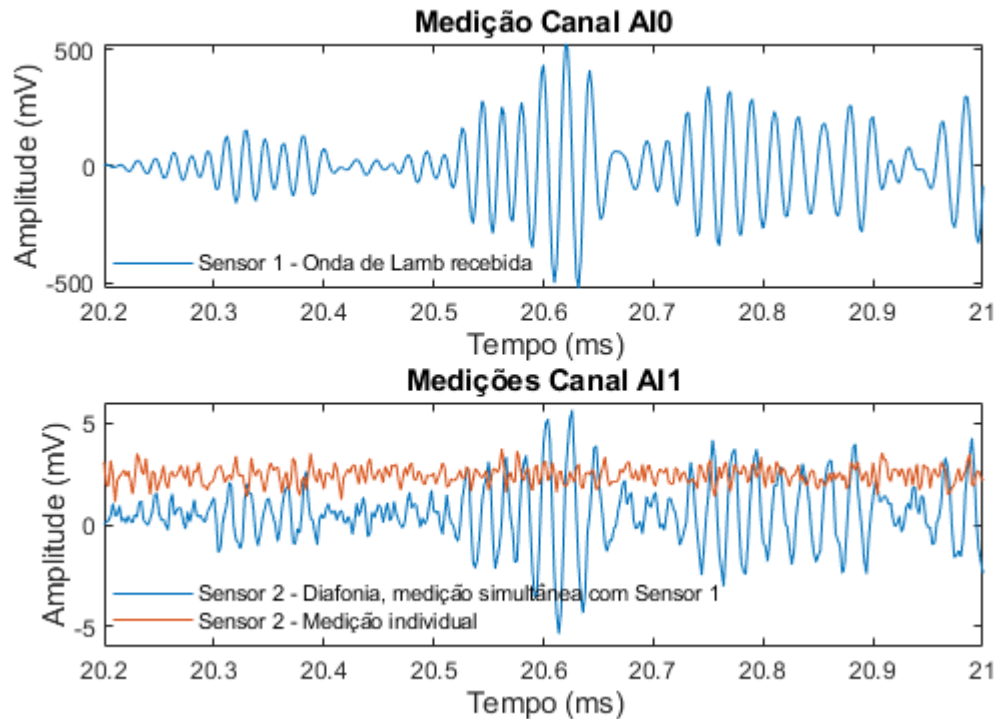
É importante ressaltar que a diafonia analisada neste experimento e quantificada usando a Equação (3) é inerente ao dispositivo DAQ e não depende das dimensões ou do tipo da estrutura monitorada, dependendo apenas da impedância dos transdutores piezelétricos, a carga de interesse neste trabalho, e da taxa de amostragem. Portanto, os resultados apresentados nesta seção podem ser estendidos para outras configurações experimentais.

Dessa forma, os resultados apresentados na Figura 21 demonstram a importância de amostrar-se uma fonte de sinal tendo uma baixa impedância, de modo a minimizar os efeitos da diafonia, sendo essa a motivação para o uso de seguidores de tensão como método de mitigação, conforme mostra a Figura 9.

5.3 EXPERIMENTO 3 – EFEITOS DA DIAFONIA NO MÉTODO DE ONDAS GUIADAS

São apresentados, na Figura 22, a seguir, os sinais de resposta obtidos dos sensores 1 e 2 simultaneamente, para excitação da Estrutura 1, e do Sensor 2 individualmente, obtidos conforme o procedimento descrito na Seção 4.3.

Figura 22 – Sinais de resposta dos sensores 1 e 2 aplicados ao método de ondas guiadas



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Observando o sinal de resposta do Sensor 2 para medição simultânea na Figura 22, é possível discernir facilmente os efeitos da diafonia. Como a Estrutura 2 não foi excitada de nenhuma forma, espera-se que o sinal de resposta do Sensor 2 seja apenas ruído de medição, como observado na medição individual deste mesmo sensor. Há, contudo, um reflexo do sinal de resposta do Sensor 1, amostrado no canal AI0, na medição realizada no canal AI1, aproximadamente 100 vezes menor, com uma amplitude baixa de aproximadamente 10 mVpp.

Dependendo das amplitudes dos sinais de resposta obtidos em um determinado sistema de SHM baseado em ondas de Lamb, este nível de intensidade de diafonia pode ser desprezível. Contudo, como sinais de resposta em sistemas de monitoramento baseados em ondas guiadas podem apresentar amplitudes pequenas, na ordem de poucos mV (Fu; Sharif-Khodaei; Aliabadi, 2019), esse sinal resultante da diafonia pode ser confundido por um sinal de resposta válido, gerando interpretações incorretas do estado de estruturas monitoradas.

Outro problema que esses sistemas de SHM enfrentam devido à diafonia é a interferência causada pelo canal de excitação nos canais de medição, devido aos altos valores de amplitude nos sinais de excitação, conforme apresentado na Seção 3.

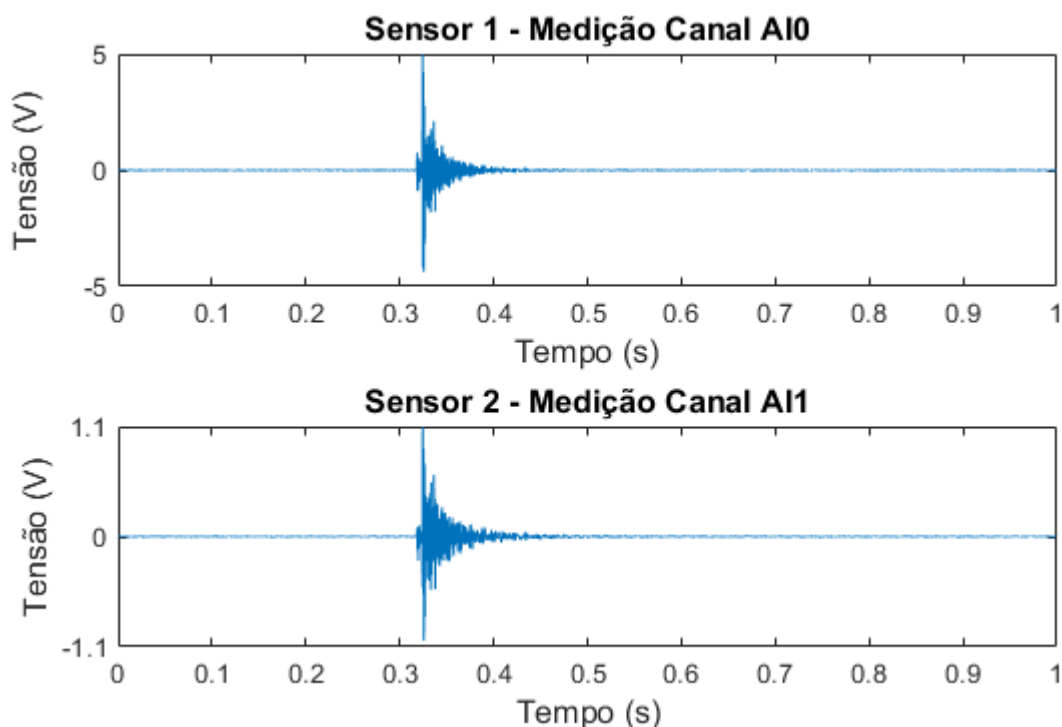
Como já mencionado, contudo, o efeito da diafonia devido ao canal de excitação geralmente pode ser facilmente detectado pelo atraso entre a geração do sinal *burst* e a propagação da onda para o sensor.

Dessa forma, pode-se dizer que os efeitos da diafonia dos canais de medição em sistemas de monitoramento baseados no método das ondas guiadas são significativos ou não dependendo da amplitude dos sinais de resposta dos transdutores empregados.

5.4 EXPERIMENTO 4 – EFEITOS DA DIAFONIA NO MÉTODO DE EMISSÃO ACÚSTICA

Na Figura 23, a seguir, são apresentados os sinais de resposta de emissão acústica obtidos dos sensores 1 e 2 simultaneamente para o método da quebra do grafite aplicado à Estrutura 1, conforme o procedimento descrito na Seção 4.4.

Figura 23 – Sinais de resposta dos sensores 1 e 2 aplicados ao método da emissão acústica



Fonte: Elaboração do próprio autor.

É possível observar, na Figura 23, que sinais de emissão acústica foram obtidos em ambos os canais. Como as estruturas estavam fisicamente separadas e o

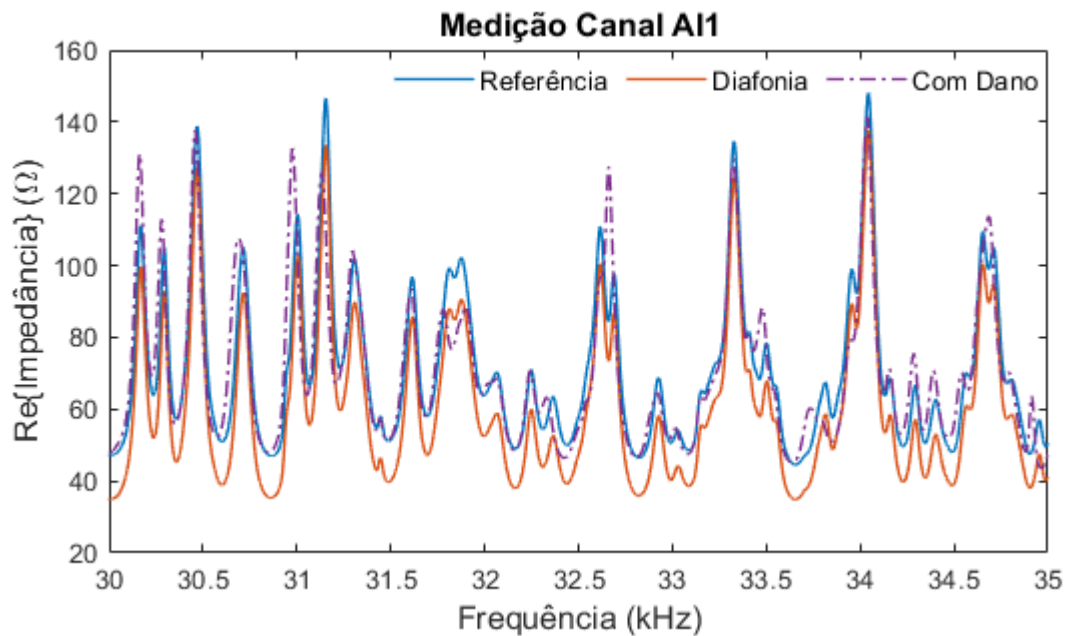
método da quebra do grafite foi aplicado apenas à Estrutura 1, temos que o sinal obtido no canal AI1, conectado ao Sensor 2, é resultante do efeito da diafonia entre os canais de aquisição. Esse sinal é um reflexo do sinal amostrado no canal AI0 e apresenta valores de tensão cerca de 5 vezes menores. É importante ressaltar que o resultado apresentado na Figura 23 é referente a uma das quatro medições realizadas conforme descrito na Seção 4.4. Todas elas, contudo, apresentaram o mesmo comportamento.

Como mencionado na Seção 2.3 deste trabalho, os sinais de resposta dos transdutores piezelétricos aplicados em sistemas de monitoramento baseados em emissão acústica podem ser de baixa intensidade, dependendo da fonte de emissão acústica a ser detectada. Dessa forma, o sinal resultante da diafonia, amostrado no canal AI1, pode ser confundido por um sinal de resposta válido em tais sistemas, levando a interpretações incorretas e a falsos positivos para a ocorrência de danos em estruturas monitoradas. Os efeitos da diafonia em tais sistemas podem, também, levar a resultados incorretos e dificuldades de aplicação de técnicas de localização de dano baseadas no tempo de recebimento dos sinais de emissão acústica.

5.5 EXPERIMENTO 5 – EFEITOS DA DIAFONIA NO MÉTODO DA IMPEDÂNCIA ELETROMECHANICA

São apresentadas, na Figura 24, as partes reais das curvas de impedância do Sensor 2 obtidas individualmente e com a Estrutura 2 sem danos (referência), simultaneamente com a medição do Sensor 1 (diafonia), e individualmente com dano simulado na Estrutura 2 através da fixação de uma porca de aço, obtidas conforme descrito na Seção 4.5. Apesar de os índices de dano RMSD terem sido calculados na faixa de frequência de 30 kHz a 50 kHz, todas as curvas de impedância são apresentadas neste trabalho na faixa de frequência de 30 kHz a 35 kHz, de modo a facilitar a visualização dos resultados.

Figura 24 – Partes reais das curvas de impedância elétrica do Sensor 2 obtidas como referência, sob efeito da diafonia e com dano pequeno

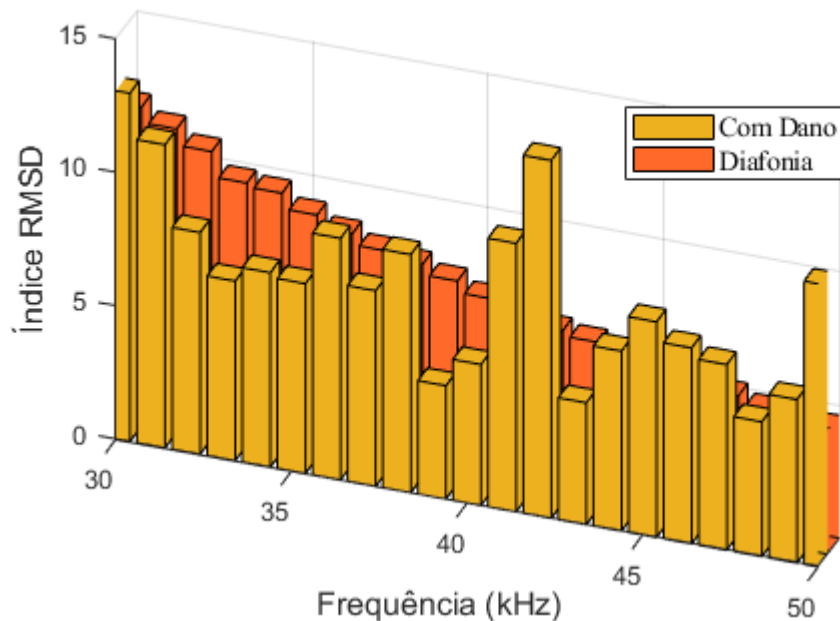


Fonte: Elaboração do próprio autor.

Como pode ser visto na Figura 24, a presença de dano na estrutura monitorada causa variações na curva de impedância elétrica do transdutor em relação à referência. Além disso, pode ser visto que a diafonia causou um deslocamento da parte real da curva de impedância elétrica do transdutor para baixo, com uma diferença de, aproximadamente, $12,4 \Omega$ na frequência de 30 kHz com relação à referência. Esse deslocamento pode gerar valores elevados no cálculo do índice de dano RMSD, podendo chegar a ser maiores que os valores para a presença de dano pequeno. Isso é difícil de afirmar, no entanto, a partir de uma análise visual das partes reais das curvas de impedância.

Dessa forma, na Figura 25, a seguir, estão apresentados os valores do índice RMSD calculados entre as curvas de impedância do Sensor 2 sob efeito da diafonia e referência, e entre as curvas de impedância com dano e referência, para a faixa de frequência de 30 kHz a 50 kHz.

Figura 25 – Índices RMSD calculados de 30 kHz a 50 kHz, com subfaixas de 1 kHz, para os casos com diafonia e com dano



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Como pode ser visto na Figura 25, os índices de dano calculados na faixa de frequência de 30 kHz a 50 kHz para a diafonia, ou seja, sem danos à estrutura, foram maiores que os índices calculados para a estrutura com dano em boa parte das frequências analisadas. Para a frequência de 39 kHz, por exemplo, o índice RMSD causado erroneamente pelos efeitos da diafonia é de, aproximadamente, 7,6, excedendo o valor do índice para a situação com dano em aproximadamente 80%, sendo o valor deste por volta de 4,2. Além disso, em várias frequências, como 30 kHz, 31 kHz, 36 kHz e 38 kHz, os valores do índice de dano para os efeitos da diafonia são próximos aos valores calculados para a presença de dano na estrutura. Dessa forma, pode-se afirmar que os efeitos da diafonia podem interferir na detecção de danos estruturais pequenos.

Na Figura 25 também pode ser visto que, no geral, com o aumento da frequência do sinal de resposta, causado pelo aumento da frequência do sinal de excitação do Sensor 2, os valores do índice RMSD calculados para os efeitos da diafonia diminuem. Dessa forma, é possível afirmar que, quanto maior a frequência do sinal de excitação do transdutor piezelétrico, menores são os efeitos da diafonia. Isso pode ocorrer devido à impedância das capacitâncias parasitas do multiplexador, que são inversamente proporcionais à frequência aplicada.

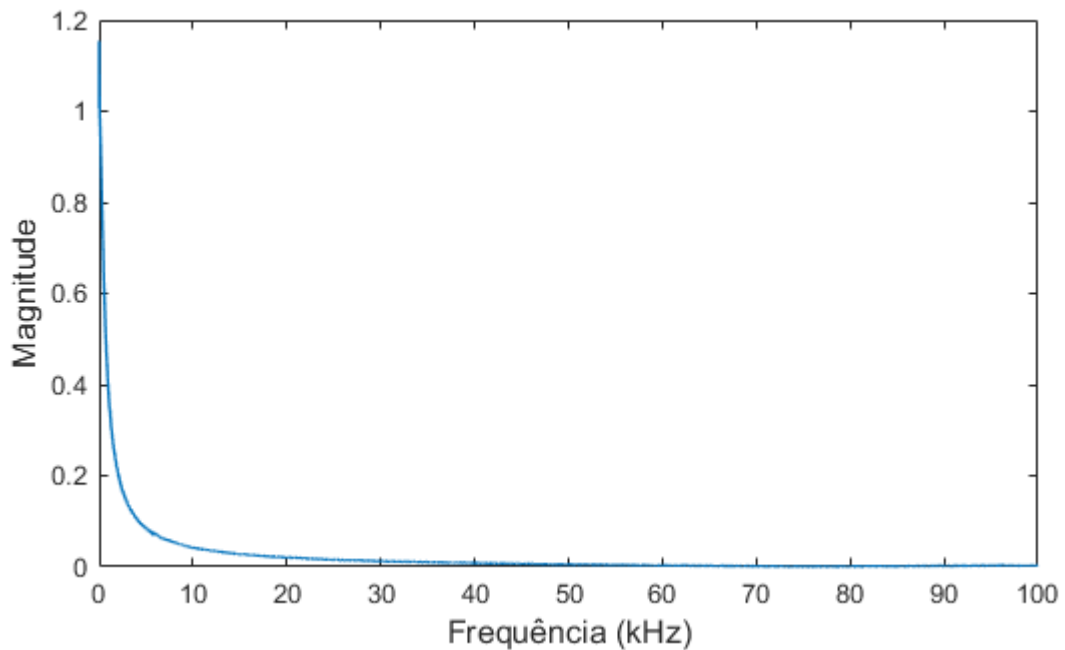
Segundo esses resultados, fica evidente que os efeitos da diafonia podem impactar a detecção de danos em um sistema de monitoramento baseado em transdutores piezelétricos e no método da impedância eletromecânica com medições realizadas por um dispositivo de aquisição de dados, podendo levar a falsos positivos ou negativos quanto à presença de dano em estruturas monitoradas, especialmente quando empregados índices de dano sensíveis a variações de amplitude, como é o caso do RMSD, que são bastante utilizados por pesquisadores. Assim, os efeitos da diafonia devem ser considerados em tais sistemas para assegurar resultados corretos das medições realizadas.

5.6 EXPERIMENTO 6 – MITIGAÇÃO DOS EFEITOS DA DIAFONIA

De acordo com os procedimentos descritos na Seção 4.6, dois métodos de mitigação foram testados para aplicação nos sistemas de SHM de interesse, em especial no baseado no método da impedância eletromecânica. O primeiro método testado foi o método baseado em FRF, no qual o sinal amostrado no canal AI0 foi multiplicado pela FRF de caracterização da diafonia obtida, invertido e então adicionado ao sinal amostrado no canal AI1.

A magnitude da função de resposta em frequência obtida na etapa de caracterização da diafonia para o método da impedância eletromecânica é apresentada na Figura 26, para toda a faixa de frequência do sinal de resposta, de 0 Hz a 100 kHz.

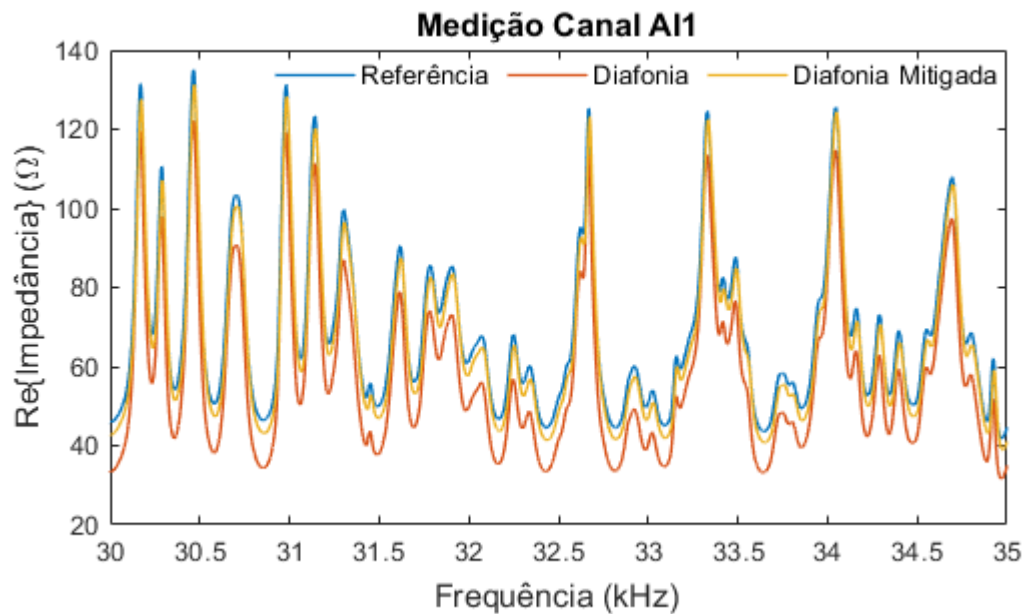
Figura 26 – Magnitude da FRF de caracterização de diafonia obtida para o sinal resultante da diafonia no canal AI1, conectado ao Sensor2, em relação ao sinal amostrado no canal AI0



Fonte: Elaboração do próprio autor.

A seguir, na Figura 27, são apresentadas as partes reais das curvas de impedância do Sensor 2 obtidas individualmente e sem dano na Estrutura 2 (referência), simultaneamente com a medição do Sensor 1 (diafonia), e simultaneamente com a medição do Sensor 1 após aplicação do método de mitigação por função de resposta em frequência no sinal de resposta do transdutor (diafonia compensada).

Figura 27 – Partes reais das curvas de impedância elétrica do Sensor 2 obtidas como referência, sob efeito da diafonia e com efeitos da diafonia mitigados por FRF



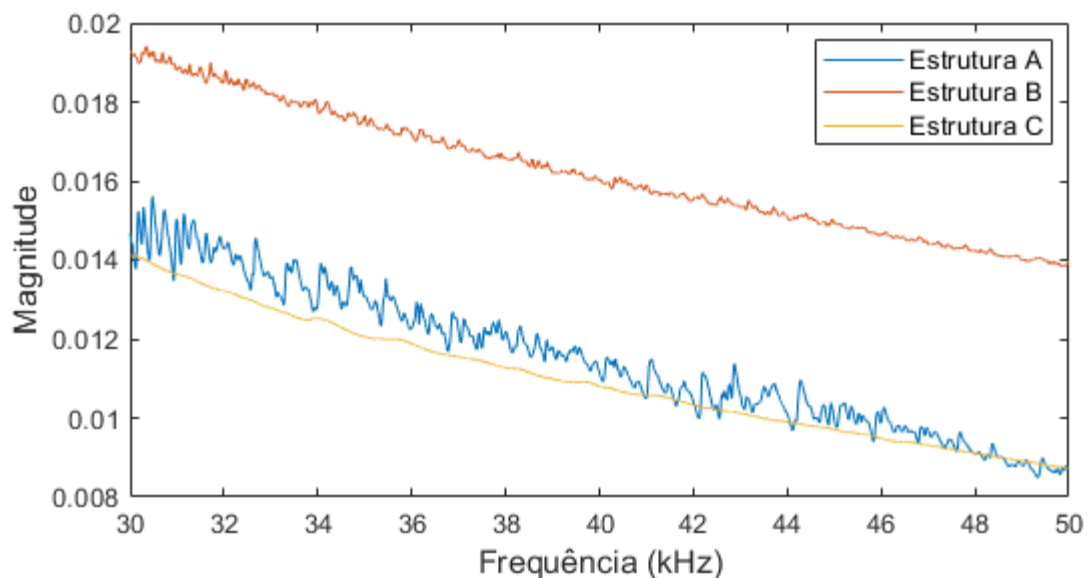
Fonte: Elaboração do próprio autor.

Como pode ser visto na Figura 27, o método baseado na função de resposta em frequência para mitigação dos efeitos da diafonia foi eficaz na faixa de frequência apresentada, aproximando os resultados para medição simultânea dos resultados para medição individual através da compensação do deslocamento da parte real da curva de impedância do transdutor. Esse deslocamento foi compensado em, aproximadamente, 73,9% na frequência de 30 kHz, mudando a diferença de impedância entre curva de referência e curva sob efeito da diafonia de, aproximadamente, 12,72 Ω para 3,32 Ω . Dessa forma, esse método de mitigação resultará, conseqüentemente, em uma redução nos valores do índice de dano RMSD, como mostrado depois, na Figura 30.

Esse método de mitigação dos efeitos da diafonia, contudo, apresenta uma limitação para aplicação em sistemas de monitoramento. Como apresentado na Seção 5.2, os efeitos da diafonia são dependentes da impedância conectada ao canal de medição utilizado. Dessa forma, a utilização deste método apresenta uma limitação para plataformas de medição em sistemas de SHM, visto que requer uma caracterização dos efeitos da diafonia para cada canal de aquisição empregado, para cada sensor e estrutura. Transdutores piezelétricos aplicados a sistemas de SHM e conectados aos canais de entrada de um dispositivo DAQ podem ter impedâncias

diferentes, mesmo que sejam do mesmo modelo devido às tolerâncias de suas propriedades. Além disso, alterações na impedância mecânica das estruturas monitoradas, por dano estrutural, por exemplo, tornam necessárias novas etapas de caracterização, devido ao acoplamento eletromecânico entre transdutor e estrutura. De modo a evidenciar essa limitação, três funções de resposta em frequência foram obtidas para três transdutores piezelétricos de mesmo modelo instalados em estruturas distintas. Um sinal *chirp* com amplitude de 5 V e faixa de frequência de 0 Hz a 100 kHz foi gerado no canal AO0 e amostrado no canal AI0. Os transdutores foram conectados ao canal AI1, que foi amostrado simultaneamente. As funções de resposta em frequência foram obtidas em relação ao sinal amostrado no canal AI0, e suas magnitudes podem ser vistas na Figura 28, abaixo, para a faixa de frequência de 30 kHz a 50 kHz, de modo a facilitar a visualização.

Figura 28 – Magnitudes das FRFs obtidas para três transdutores piezelétricos de mesmo modelo instalados em estruturas diferentes

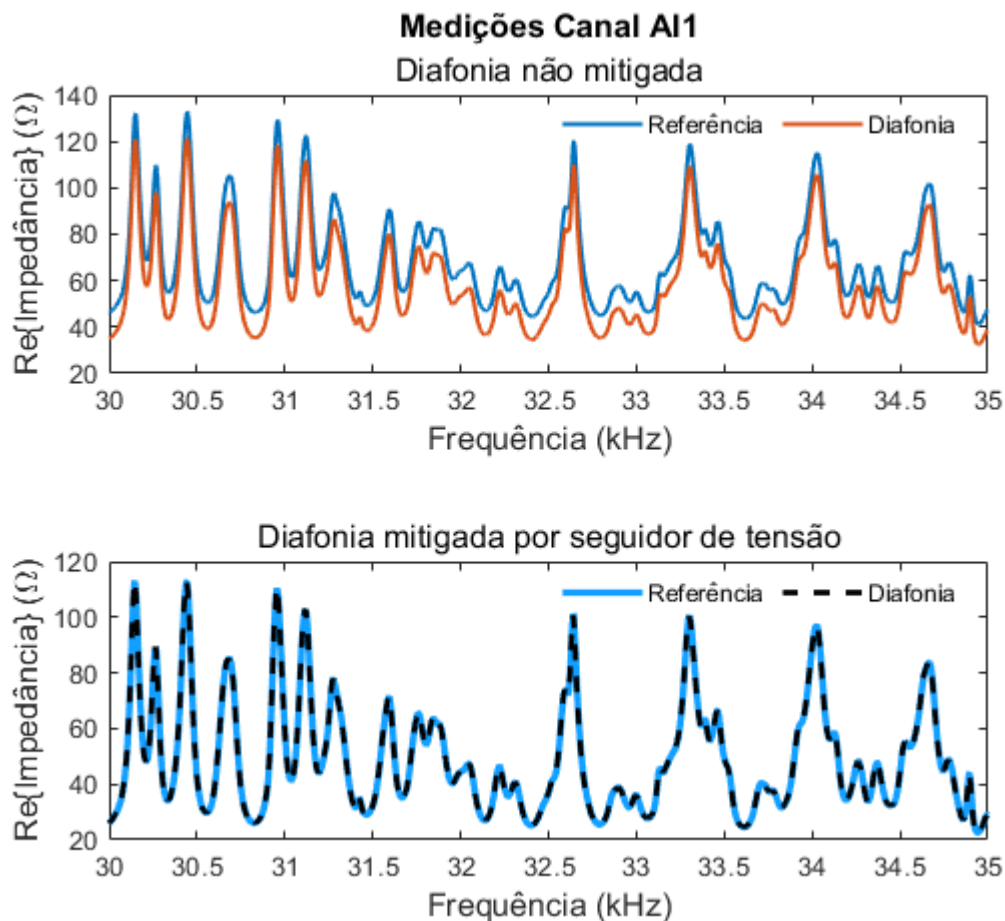


Fonte: Elaboração do próprio autor.

A Figura 28 evidencia a limitação mencionada anteriormente, mostrando que as magnitudes das funções de resposta em frequência obtidas são diferentes, mesmo sendo obtidas para transdutores de mesmas dimensões usando-se os mesmos canais do dispositivo DAQ. Assim, uma FRF obtida não pode ser usada para mitigar os efeitos da diafonia para diferentes transdutores ou estruturas, mesmo que os canais de entrada analógicos usados sejam os mesmos.

O segundo método de mitigação testado consistiu na aplicação de um amplificador operacional como seguidor de tensão entre o sensor e o canal de entrada. As partes reais das assinaturas de impedância do Sensor 2 obtidas individualmente e sem danos na Estrutura 2 (referência) e simultaneamente com a curva de impedância do Sensor 1 (diafonia), com e sem aplicação do seguidor de tensão, podem ser vistas na Figura 29.

Figura 29 – Partes reais das curvas de impedância elétrica do Sensor 2 obtidas como referência e sob efeito da diafonia, com e sem mitigação por seguidor de tensão

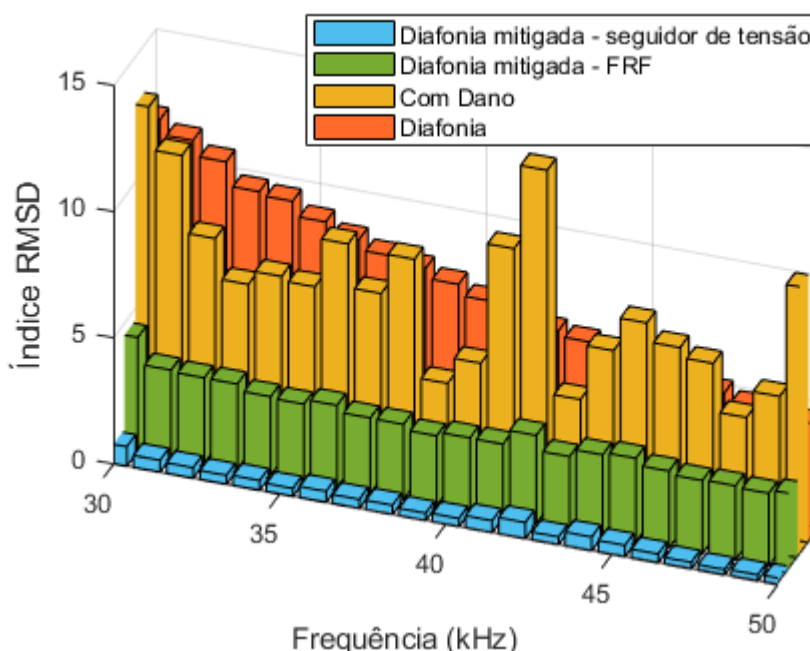


Fonte: Elaboração do próprio autor.

A Figura 29 evidencia que o método de mitigação baseado no uso de seguidor de tensão é bastante eficaz para sistemas de SHM baseados no método da impedância eletromecânica, praticamente eliminando os efeitos de diafonia nas assinaturas de impedância obtidas. Isso acontece porque um amplificador operacional tem uma alta impedância de entrada e uma baixa impedância de saída, e a diafonia

entre canais de entrada analógicos é significativamente baixa, abaixo de -90 dB, com baixas impedâncias de carga, como visto na Figura 21. O amplificador operacional usado neste trabalho, CA3140EZ, tem uma impedância de saída de 60 Ω com um valor de ganho unitário. A eficácia da mitigação dos efeitos da diafonia usando-se o método baseado em seguidores de tensão pode ser quantificada nos índices de dano RMSD, apresentados, a seguir, na Figura 30, na qual os índices de dano calculados para o método de mitigação baseado em FRF também são mostrados para comparação. Também estão apresentados, para fins de comparação, os valores do índice RMSD calculados entre as curvas de impedância com dano e referência, apresentados anteriormente na Figura 25.

Figura 30 – Índices RMSD calculados de 30 kHz a 50 kHz, com subfaixas de 1 kHz, para os casos com diafonia, com dano e com diafonia mitigada



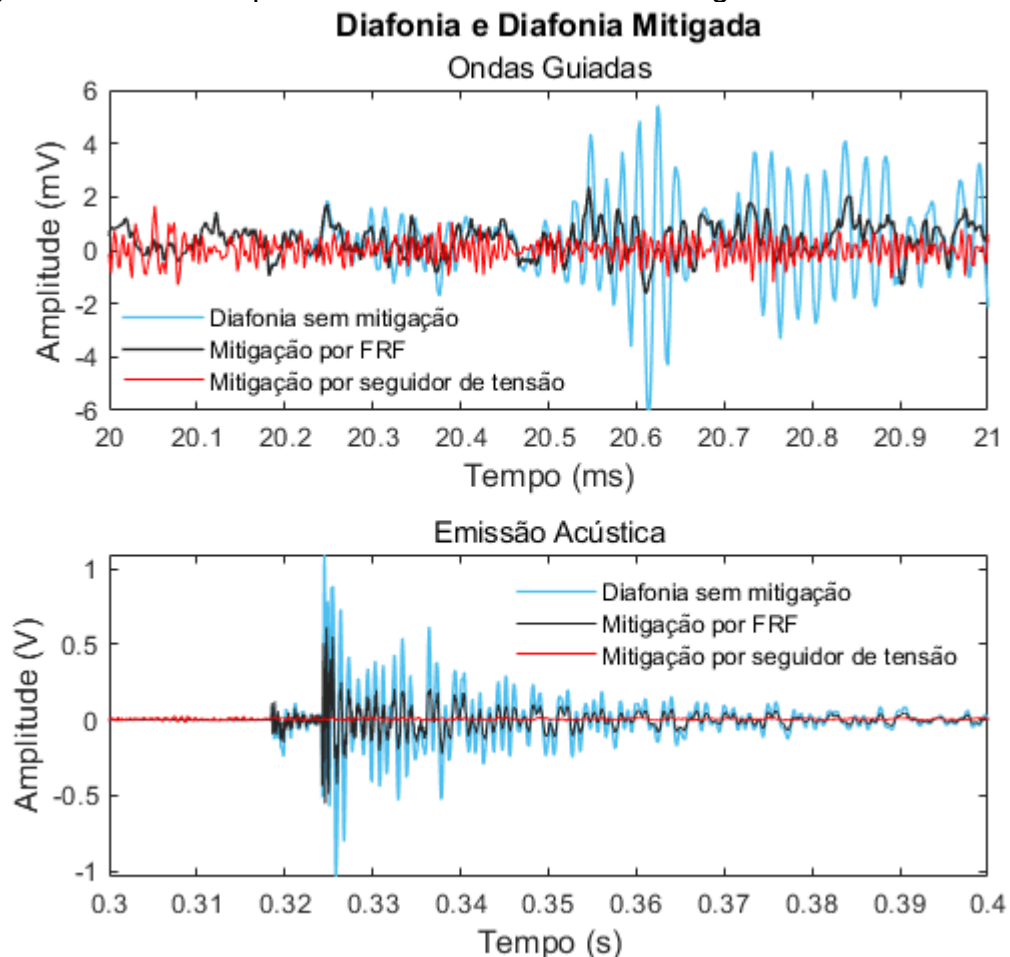
Fonte: Elaboração do próprio autor.

De acordo com a Figura 30, o método de mitigação baseado na função de resposta em frequência foi eficaz na redução dos valores do índice de dano causados pelos efeitos da diafonia em todos os valores de frequência analisados, representando, por exemplo, uma redução de 62,2% para a frequência de 30 kHz. No entanto, em algumas frequências, essa redução não é tão significativa em comparação ao índice causado por dano estrutural real. Para a frequência de 39 kHz, o índice RMSD é de aproximadamente 2,8 após a mitigação da diafonia pelo método

baseado em FRF, que é aproximadamente 67% do valor do índice de 4,2 causado por danos estruturais, dificultando o estabelecimento de um limite seguro para a detecção de danos incipientes. Por outro lado, os índices RMSD obtidos após a mitigação da diafonia usando o seguidor de tensão foram menores que 0,8 em todas as frequências analisadas, possibilitando o estabelecimento de um limite seguro para detectar danos incipientes e evitar diagnósticos falso-positivos da estrutura monitorada.

Embora o foco tenha sido no método da impedância eletromecânica, esses métodos de mitigação também podem reduzir os efeitos da diafonia nos métodos de detecção de danos baseados em ondas guiadas e emissão acústica. A Figura 31, a seguir, mostra os sinais amostrados resultantes da diafonia para os métodos de ondas guiadas e emissão acústica, sem e com mitigação usando os métodos baseados em FRF e seguidor de tensão.

Figura 31 – Comparação dos métodos de mitigação da diafonia por FRF e por seguidor de tensão aplicados aos métodos de ondas guiadas e emissão acústica



Fonte: Elaboração do próprio autor.

De acordo com a Figura 31, o uso do seguidor de tensão praticamente eliminou a diafonia no método da emissão acústica, uma vez que o sinal mitigado por esse método é muito menor quando comparado ao sinal resultante da diafonia não mitigado e ao sinal mitigado usando-se o método da FRF. Por outro lado, ambos os métodos de mitigação mostraram desempenhos semelhantes para mitigar a diafonia no método de ondas guiadas, mas o uso do seguidor de tensão ainda mostrou melhores resultados. É perceptível que o sinal mitigado usando o seguidor de tensão consiste apenas em ruído, sem correlação com o sinal amostrado de onda de Lamb. O ruído pode ser reduzido por blindagem, escolhendo um amplificador operacional e fonte de alimentação de baixo ruído ou calculando a média de várias medições.

6 CONCLUSÃO

Neste trabalho, foi apresentada uma análise dos efeitos da diafonia dos dispositivos de aquisição de dados em sistemas de monitoramento de integridade estrutural, com foco em sistemas baseados no método da impedância eletromecânica. Além disso, este trabalho verifica a eficácia de dois métodos de mitigação dos efeitos da diafonia aplicados a esses sistemas.

Inicialmente, um teste básico para verificação e quantificação dos efeitos da diafonia foi realizado para três dispositivos de aquisição de dados disponíveis: NI USB-6361, NI USB-6366 e NI PXIe-1071. Nos resultados, foi possível observar os efeitos da diafonia nos três dispositivos, mas, como o dispositivo NI USB-6361 apresentou os efeitos mais significativos, devido a seus canais de medição serem multiplexados, optou-se por seguir os experimentos o utilizando.

Em seguida, os efeitos da taxa de amostragem empregada no dispositivo de aquisição de dados e das impedâncias de carga conectadas a seus canais na diafonia foram verificados. Os resultados indicaram que aumentos na taxa de amostragem e na impedância de carga geram aumentos nos efeitos da diafonia em um dispositivo de aquisição de dados.

Na sequência, os efeitos da diafonia foram analisados em métodos de detecção de dano estrutural aplicados em sistemas de SHM. Nestes testes, foram empregadas duas placas de alumínio como estruturas, ambas equipadas com transdutores piezelétricos. Duas estruturas distintas e separadas fisicamente foram escolhidas de modo a garantir que interferências nas medições fossem decorrentes dos efeitos da diafonia entre os canais de medição do dispositivo DAQ. Os resultados indicaram conclusivamente que a diafonia pode alterar significativamente os sinais amostrados por transdutores piezelétricos empregados em diversos métodos de detecção de danos, possivelmente levando a um diagnóstico falso da estrutura monitorada. Para o método de detecção de danos baseado na impedância eletromecânica, por exemplo, a diafonia faz com que as assinaturas de impedância mudem o suficiente para tornar os índices de danos erroneamente maiores que os valores obtidos para um dano estrutural real, o que pode levar a um diagnóstico falso. Sob as condições experimentais consideradas neste estudo, a diafonia em torno de -50 dB entre dois canais do dispositivo DAQ analisado é suficiente para causar uma variação no índice RMSD aproximadamente 80% maior que para um dano estrutural em alguns valores

de frequência. É importante notar que a diafonia do dispositivo DAQ é intrínseca ao dispositivo usado e os resultados relatados neste trabalho podem ser estendidos a outras configurações experimentais. No entanto, o impacto da diafonia nas medições dependerá da intensidade de seus efeitos, de acordo com o modelo do DAQ usado e do nível de dano estrutural a ser detectado.

De modo a garantir medições confiáveis e um diagnóstico correto da estrutura monitorada, os resultados destacam a necessidade de pesquisadores levarem em conta os efeitos da diafonia em plataformas de medição, buscando formas de mitigar seus efeitos. Assim, neste trabalho, a eficácia de dois métodos de mitigação baseados em função de resposta de frequência e em seguidores de tensão foram avaliados e comparados para reduzir a diafonia nos canais de aquisição de um dispositivo DAQ para aplicação em sistemas de SHM. Os resultados indicaram um desempenho superior no uso do seguidor de tensão para reduzir a diafonia, tornando as variações nos sinais de resposta do sensor praticamente desprezíveis e reduzindo os índices RMSD, no método da impedância eletromecânica, a valores próximos de zero, que é a condição ideal quando não há danos estruturais. Embora o método baseado na caracterização da diafonia por meio da função de resposta de frequência entre os canais de medição de interesse tenha reduzido a diafonia, essa redução pode não ser suficiente para permitir a definição de um limite para uma detecção segura de danos estruturais incipientes.

Portanto, os resultados relatados neste trabalho destacam a importância de se considerar os efeitos da diafonia de dispositivos DAQ em sistemas de monitoramento de integridade estrutural. Os resultados relatados podem ser úteis para pesquisadores no desenvolvimento de plataformas de medição confiáveis para a detecção de danos estruturais incipientes.

REFERÊNCIAS

ALAZZAWI, O.; WANG, D. Health monitoring of an assembly-type structure using raw time-domain EMI signals and a novel hybrid deep learning algorithm. **Smart Materials and Structures**, v. 33, p. 025038, 2024.

ASTM. Standard guide for determining the reproducibility of acoustic emission sensor response. **ASTM standard E976-10**, 2010. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1520/E0976-10>

ATZORI, A.; CARULLO, A.; CORBELLINI, S.; VALLAN, A. Crosstalk effects in the uncertainty estimation of multiplexed data acquisition systems. **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**, v. 70, p. 1503411, 2021.

BAPTISTA, F.G.; VIEIRA FILHO, J. A new impedance measurement system for PZT-based structural health monitoring. **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**, v. 58, n. 10, p. 3602-3608, 2009.

CAMPEIRO, L. M. **Detecção de dano estrutural em ambientes ruidosos baseada na impedância eletromecânica e ondas de Lamb com diafragmas piezelétricos excitados com sinais de alta frequência**. 2021. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Faculdade de Engenharia de Bauru, Universidade Estadual Paulista, Bauru, 2021.

DA SILVA, C.J.R.; BUDOYA, D.E.; BAPTISTA, F.G. Improving impedance measurement for structural health monitoring by setting the appropriate number of excitation signal cycles. **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**, v. 73, p. 1-12, 2024.

DRAUDVILIENÉ, L.; MEŠKUOTIENÉ, A. The methodology for the reliability evaluation of the signal processing methods used for the dispersion estimation of Lamb waves. **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**, v. 71, p. 1001607, 2022.

FERREIRA, F.; DE AGUIAR, P.; DA SILVA, R.; JACKSON, M.; BAPTISTA, F.; BIANCHI, E. Monitoring of cylindrical plunge grinding process by electromechanical impedance. **IEEE Sensors Journal**, v. 22, n. 12, p. 12314-12322, 2022.

FU, H.; SHARIF-KHODAEI, Z.; ALIABADI, M.H.F. An energy-efficient cyber-physical system for wireless on-board aircraft structural health monitoring. **Mechanical Systems and Signal Processing**, v. 128, p. 352-368, 2019.

FU, W.; ZHOU, R.; GUO, Z. Concrete acoustic emission signal augmentation method based on generative adversarial networks. **Measurement**, v. 231, p. 114574, 2024.

GORDAN, M.; SABBAGH-YAZDI, S.; ISMAIL, Z.; GHAEDI, K.; CARROLL, P.; MCCRUM, D.; SAMALI, B. State-of-the-art review on advancements of data mining in structural health monitoring. **Measurement**, v. 193, p. 110939, 2022.

HASSAN, F.; MAHMOOD, A.; YAHYA, N.; SABOOR, A.; ABBAS, M.; KHAN, Z.; RIMSAN, M. State-of-the-art review on the acoustic emission source localization techniques. **IEEE Access**, v. 9, p. 101246-101266, 2021.

HE, B.; WEI, C.; DING, S.; SHI, Z. A survey of methods for detecting metallic grinding burn. **Measurement**, v. 134, p. 426-439, 2019.

LAFLAMME, S.; UBERTINI, F.; DI MATTEO, A.; PIRROTTA, A.; PERRY, M.; FU, Y.; LI, J.; WANG, H.; HOANG, T.; GLISIC, B.; BOND, L.J.; PEREIRA, M.; SHU, Y.; LOH, K.J.; WANG, Y.; DING, S.; WANG, X.; YU, X.; HAN, B.; GOLDFELD, Y.; RYU, D.; NAAPOLITANO, R.; MOREU, F.; GIARDINA, G.; MILILLO, P. Roadmap on measurement technologies for next generation structural health monitoring systems. **Measurement Science and Technology**, v. 34, p. 093001, 2023.

LAMBINET, F.; KHODAEI, Z. Measurement platform for structural health monitoring application of large scale structures. **Measurement**, v. 190, p. 110675, 2022.

NATIONAL INSTRUMENTS. **DAQ X Series: X Series User Manual**, 370784K-01, 2019. Disponível em: <https://www.ni.com/docs/en-US/bundle/pcie-pxie-usb-63xx-features/resource/370784k.pdf>

QIU, L.; YUAN, S. On development of a multi-channel PZT array scanning system and its evaluating application on UAV wing box. **Sensors and Actuators A: Physical**, v. 151, p. 220-230, 2009.

QIU, L.; YUAN, S.; SHI, X.; HUANG, T. Design of piezoelectric transducer layer with electromagnetic shielding and high connection reliability. **Smart Materials and Structures**, v. 21, p. 075032, 2012.

SHEN, C. Acoustic emission based grinding wheel wear monitoring: Signal processing and feature extraction. **Applied Acoustics**, v. 196, p. 108863, 2022.

SOFI, A.; REGITA, J.; RANE, B.; LAU, H. Structural health monitoring using wireless smart sensor network - An overview. **Mechanical Systems and Signal Processing**, v. 163, p. 108113, 2022.

TAMHANE, D.; BANERJEE, S.; TALLUR, S. Monitoring corrosion in sacrificial anodes with pulsed eddy current and electromechanical impedance: A comparative analysis. **IEEE Sensors Journal**, v. 22, n. 8, p. 8147-8154, 2022.

TENREIRO, A.; LOPES, A.; DA SILVA, L. A review of structural health monitoring of bonded structures using electromechanical impedance spectroscopy. **Structural Health Monitoring**, v. 21, n. 2, p. 228-249, 2022.

VIEIRA FILHO, J.; CORTEZ, N.E.; DE OLIVEIRA, M.; LIMA, L.P.M.; PARK, G. Structural damage detection using PZT transmission line circuit model. **Sensors**, v. 24, p. 7113, 2024.

WITZEL, J. Crosstalk in DAQ. **IEEE Instrumentation & Measurement Magazine**, v. 8, p. 59-63, 2005.