



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”

**Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Elétrica**

**Estudo dos Efeitos da Radiação em Sistemas SHM Utilizando o
Método da Impedância Eletromecânica para Aplicações
Aeroespaciais e Instalações Nucleares**

Helder Luiz Taveira de Assis

Bauru – SP
2023



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

**“Estudo dos Efeitos da Radiação em Sistemas SHM Utilizando o
Método da Impedância Eletromecânica para Aplicações
Aeroespaciais e Instalações Nucleares”**

Helder Luiz Taveira de Assis

Dissertação apresentada ao programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Faculdade de Engenharia de Bauru (FEB) – UNESP, para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Fernando de Souza Campos

Bauru – SP
2023

De Assis, Helder Luiz Taveira.

Estudo dos Efeitos da Radiação em Sistemas SHM
Utilizando o Método da Impedância Eletromecânica para
Aplicações Aeroespaciais e Instalações Nucleares/
Helder Luiz Taveira de Assis, 2023

51 f.: il.

Orientador: Prof. Dr. Fernando de Souza Campos

Dissertação (Mestrado)- Universidade Estadual
Paulista (Unesp). Faculdade de Engenharia de Bauru
(FEB, Bauru, 2023).

1. Monitoramento de Integridade Estrutural (SHM).
2. Piezoeletricidade. 3. Transdutor. 4. Radiação. 5.
Impedância Eletromecânica. I. Universidade Estadual
Paulista. Faculdade de Engenharia de Bauru. II.
Título.

ATA DA DEFESA PÚBLICA DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DE HELDER LUIZ TAVEIRA DE ASSIS, DISCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA, DA FACULDADE DE ENGENHARIA - CÂMPUS DE BAURU.

Aos 05 dias do mês de dezembro do ano de 2023, às 14:00 horas, por meio de Videoconferência, realizou-se a defesa de DISSERTAÇÃO DE MESTRADO de HELDER LUIZ TAVEIRA DE ASSIS, intitulada **ESTUDO DOS EFEITOS DA RADIAÇÃO EM SISTEMAS SHM UTILIZANDO O MÉTODO DA IMPEDÂNCIA ELETROMECAÂNICA PARA APLICAÇÕES AEROESPACIAIS E INSTALAÇÕES NUCLEARES**. A Comissão Examinadora foi constituída pelos seguintes membros: Prof. Dr. FERNANDO DE SOUZA CAMPOS (Orientador(a) - Participação Virtual) do(a) Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Bauru UNESP, Prof. Dr. CARLOS ALBERTO ZEITUNI (Participação Virtual) do(a) Departamento de Tecnologia Nuclear / IPEN / USP, Prof. Dr. FABRICIO GUIMARÃES BAPTISTA (Participação Virtual) do(a) Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Bauru - UNESP. 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. FERNANDO DE SOUZA CAMPOS



IMPACTO POTENCIAL DESSA PESQUISA

O desenvolvimento de sistemas de monitoramento de integridade de estruturas é de fundamental importância para detecção de danos estruturais na fase inicial possibilitando assim a devida manutenção evitando falhas graves ou até mesmo o colapso das estruturas. Plantas nucleares, aviões e naves aeroespaciais são exemplos de estruturas que requer alto grau de segurança. Entretanto a aplicação de sistemas de monitoramento em ambiente suscetível à radiação ainda é um desafio. Atualmente não há informações na literatura sobre o efeito da radiação em sistemas de monitoramento de integridade estrutural e sua viabilidade. Assim, esta pesquisa tem por objetivo o estudo do efeito de radiação utilizando método da impedância eletromecânica na detecção de danos estruturais.

POTENTIAL IMPACT OF THIS RESEARCH

The development of structural integrity monitoring systems is of fundamental importance for detecting structural damage in the initial phase, thus enabling proper maintenance, avoiding serious failures or even the collapse of structures. Nuclear plants, airplanes and aerospace ships are examples of structures that require a high degree of safety. However, the application of monitoring systems in an environment susceptible to radiation is still a challenge. There is currently no information in the literature about the effect of radiation on structural integrity monitoring systems and their feasibility. Therefore, this research aims to study the effect of radiation using the electromechanical impedance method in detecting structural damage.

Dedico aos meus avós maternos, Veriano Taveira (in memorian) e Sebastiana Rodrigues de Souza Taveira (in memorian), por sempre apoiarem meus estudos e por acreditarem que a educação é o melhor caminho.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, por ter guiado meus passos até hoje, e por sempre iluminar meus pensamentos para que eu faça escolhas assertivas.

À minha mãe, Aparecida Rodrigues Taveira, que mesmo diante de tantas dificuldades, não deixou de incentivar e apoiar-me. Agradeço o amor e dedicação de uma vida inteira na busca de proporcionar sempre o melhor.

A minha esposa, Marina Lais Sabião de Toledo Piza, pelo companheirismo e amor, por ter aguentado meus momentos de estresse e angústia durante esse período de estudos, e por ter me dado força e apoio para nunca desistir.

Aos meus familiares e amigos pelo suporte e incentivo, por terem me apoiado nos momentos difíceis, e por terem me animado quando o cansaço era inevitável.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Fernando de Souza Campos, pela profunda dedicação e ajuda durante todas as etapas deste trabalho, por todo suporte e compreensão com minhas rotinas de estudos e trabalho. Obrigado pela confiança e por todos os ensinamentos que me foram transmitidos.

A todos os professores do Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, pelos ensinamentos ao longo desse período, tive a honra de ter como professores pessoas maravilhosas e altamente capacitadas a exercerem esse cargo tão nobre. Obrigado por servirem como exemplo para mim.

À Universidade Estadual Paulista UNESP e aos funcionários da Faculdade de Engenharia de Bauru (FEB), como porteiros, auxiliares de limpeza, técnicos de laboratórios, secretários e todos os outros que sempre zelaram pelo bom funcionamento da instituição de ensino.

A Escola SENAI de Bauru e a todos os Gestores do SENAI SP por apoiarem meus estudos e me encorajarem a seguir em frente em meus projetos profissionais.

Enfim, agradeço imensamente a todos que cruzaram meu caminho ao longo dessa jornada. Não foi fácil chegar até aqui, e sem Deus, família, amigos, colegas, professores, funcionários e parceiros eu não teria conseguido completar mais essa missão em minha vida. Minha eterna gratidão a todos!!!

*"Uma mente que se abre a uma nova ideia jamais voltará ao seu tamanho original."
(Albert Einstein)*

RESUMO

Este trabalho apresenta um estudo experimental da influência da radiação nos sistemas de monitoramento de integridade estrutural, do inglês *Structural Health Monitoring* (SHM), com base no método de impedância eletromecânica usando diafragmas piezelétricos de baixo custo. Para aplicação do método, a medida de referência foi obtida sem radiação e depois comparada pelos índices de dano após a aplicação da radiação. Considerando as aplicações nas usinas nucleares, a irradiação e o cálculo dos índices de dano foram realizados na faixa de 10 kGy a 60 kGy em intervalos de 10 kGy. As medidas de impedância foram realizadas em 7 bandas de frequência entre 0 à 65 kHz. Os resultados mostram que, devido à alteração nas assinaturas de impedância, os valores dos índices de dano aumentam de acordo com a dose total de radiação aplicada, o que pode indicar uma falsa indicação de dano. Além disso, os resultados indicam que existem bandas de frequência menos sensíveis à radiação e um limiar pode ser definido para distinguir a radiação de danos estruturais.

Palavras-Chave: Monitoramento de Integridade Estrutural (SHM), piezoeletricidade, transdutor, radiação, impedância eletromecânica.

ABSTRACT

This work presents an experimental study of the influence of radiation on Structural Health Monitoring (SHM) systems based on the electromechanical impedance method using low-cost piezoelectric diaphragms. For application of the method, the baseline was obtained without radiation and then compared by damage indices after application of radiation. Considering applications in nuclear power plants, the irradiation and calculation of damage indices were performed in the range of 10 kGy to 60 KGy at 10 kGy intervals. Impedance measurements were performed in 7 frequency bands between 0 to 65 kHz. The results show that, due to the change in the impedance signatures, the damage indices values increase according to the total applied radiation dose, which may indicate a false indication of damage. Besides, results indicate that there are frequency bands less sensitive to radiation and a threshold can be defined to distinguish radiation from structural damage.

Keywords: Structural Health Monitoring (SHM), piezoelectricity, transducer, radiation, electromechanical impedance.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Princípio básico da impedância EMI.....	17
Figura 2: (a) Placa de Alumínio e Ímã de Neodímio (b) notebook com aplicativo do LabVIEW e sistema DAQ (c) Célula Gama.....	24
Figura 3: Metodologia das Medidas Experimentais.....	25
Figura 4: Assinatura de Impedância (parte real) para diferentes níveis de radiação.....	26
Figura 5: Índices CCDM (a) e RMSD (b) sem dano na faixa de frequência de 2 kHz à 10 kHz.....	27
Figura 6: Índices CCDM (a) e RMSD (b) sem dano na faixa de frequência de 10 kHz à 20 kHz.....	28
Figura 7: Índices CCDM (a) e RMSD (b) sem dano na faixa de frequência de 20 kHz à 30 kHz.....	29
Figura 8: Índices CCDM (a) e RMSD (b) sem dano na faixa de frequência de 30 kHz à 40 kHz.....	30
Figura 9: Índices CCDM (a) e RMSD (b) sem dano na faixa de frequência de 40 kHz à 50 kHz.....	31
Figura 10: Índices CCDM (a) e RMSD (b) sem dano na faixa de frequência de 50 kHz à 65 kHz.....	32
Figura 11: Índices CCDM (a) e RMSD (b) sem dano na faixa de frequência de 0 kHz à 65 kHz.....	33
Figura 12: Índices CCDM (a) e RMSD (b) na faixa de frequência de 2 kHz à 10 kHz.....	35
Figura 13: Índices CCDM (a) e RMSD (b) na faixa de frequência de 10 kHz à 20 kHz.....	36
Figura 14: Índices CCDM (a) e RMSD (b) na faixa de frequência de 20 kHz à 30 kHz.....	37
Figura 15: Índices CCDM (a) e RMSD (b) na faixa de frequência de 30 kHz à 40 kHz.....	38
Figura 16: Índices CCDM (a) e RMSD (b) na faixa de frequência de 40 kHz à 50 kHz.....	39
Figura 17: Índices CCDM (a) e RMSD (b) na faixa de frequência de 50 kHz à 65 kHz.....	40
Figura 18: Índices CCDM (a) e RMSD (b) na faixa de frequência de 0 à 65 kHz.....	41

LISTA DE SIGLAS E DEFINIÇÕES

CCDM	<i>Correlation Coefficient Deviation Metric</i> – Desvio do coeficiente de correlação
DAQ	<i>Data Acquisition</i> – Dispositivo de aquisição de dados
EMI	Método de Impedância Eletromecânica
LabVIEW	<i>Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench</i>
PZT	<i>Pb-Lead ZirconateTitanate</i> – Titanato zirconato de chumbo
PWAS	<i>Piezoelectric Wafer Active Sensors</i> - Sensores ativos de pastilhas piezoelétrica
RMSD	<i>Root Mean Square Deviation</i> – Desvio da raiz quadrática média
SHM	<i>Structural Health Monitoring</i> – Monitoramento de integridade estrutural
USB	<i>Universal Serial Bus</i> – Barramento serial universal

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Descrição	Unidade
C	Capacitância estática	F
D_m	Deslocamento Elétrico	C / m ²
E	Campo Elétrico	V / m
H	Campo magnético	
H_k	Componentes de campo magnético	Adimensional
H_m	Componentes de campo magnético	Adimensional
S_α	Tensor de deformação mecânica (strain)	Adimensional
$s_{\alpha\beta}$	Tensor de elasticidade do material	Adimensional
T_β	Tensor de tensão mecânica	Adimensional
T	Tensão mecânica ou stress	N / m
θ	Temperatura	
Z	Impedância elétrica	Ω
Z_E	Impedância elétrica do transdutor	Ω
Z_P	Impedância mecânica do transdutor	N.s / m
Z_S	Impedância mecânica da estrutura monitorada	N.s / m
α_α	Coefficientes de expansão térmica	
$d_{m\beta}$	Constante Piezelétrica	m / V
$d_{\beta m}$	Constante Piezelétrica	m / V
d_{31}	Constante Piezelétrica	m / V
ε_{mk}	Constantes de permissividade dielétrica do material	F / m

ε_{33}^T	Permissividade dielétrica	F / m
f	Frequência	Hz
j	Unidade imaginária	Adimensional
m_{mk}	Constantes magnetodielétricas	
p_m	Constantes piroelétricas	
s_{11}^E	Tensor de elasticidade ou compliance	m ² / N
ω	Frequência	Hz

SUMÁRIO

Capítulo 1

1. Introdução.....	12
1.1. Objetivos.....	13
1.2. Justificativas e Motivação.....	14
1.3. Organização do trabalho.....	14

Capítulo 2

2. Revisão bibliográfica.....	15
2.1. Princípio da Impedância Eletromecânica.....	15
2.2. Materiais Transdutores Piezoelétricos.....	15
2.3. A Técnica da Impedância Eletromecânica.....	17
2.4. Efeito da Radiação Ionizante em Sistemas SHM.....	19

Capítulo 3

3. Materiais e Método.....	23
----------------------------	----

Capítulo 4

4. Resultados e Discussão.....	26
4.1. Baseline e Índices sem Dano sob Efeito da Radiação.....	26
4.2. Índices CCDM e RMSD com Dano sob Efeito da Radiação.....	34
4.3. Discussão.....	42

Conclusão.....	44
----------------	----

Referências.....	45
------------------	----

Capítulo 1

Introdução

O campo de monitoramento de integridade estrutural (SHM) tem sido objeto de pesquisas e interesse na indústria. As técnicas de SHM permitem detectar danos estruturais antes que ocorra uma falha na garantia de segurança humana (KRALOVEC; SCHARGERL, 2020; MOLL et al., 2020). Além disso, as técnicas de SHM também reduzem os custos de manutenção e foram usadas em vários campos de aplicação, como engenharia civil, aeroespacial e indústria naval. Existem várias técnicas de SHM propostas na literatura, como correntes de Foucault, sensores de fibra óptica, termografia por infravermelho, ondas de Lamb e emissão acústica (OSTACHOWICS; SOMAN; MANILOWSKI, 2019; GORGIN; LUO, 2020). Entre essas técnicas, o Método de Impedância Eletromecânica (EMI), é uma das técnicas SHM mais promissoras.

A principal vantagem da técnica EMI é realizar detecção de danos não invasivos usando transdutores piezelétricos de baixo custo. A técnica EMI baseia-se em uma medição de impedância em vários intervalos de frequência. Nesta técnica, a impedância do transdutor fixado na estrutura está relacionada à impedância mecânica da estrutura. Portanto, quando ocorre uma falha, muda a impedância mecânica da estrutura e, conseqüentemente, a impedância elétrica do transdutor instalado. A detecção de danos é realizada comparando uma assinatura de impedância de referência da estrutura íntegra (também chamada de medida de referência) com uma impedância extraída de uma inspeção. Para quantificar a condição estrutural, dois principais índices de dano são comumente usados para realizar a detecção de falhas e sua evolução. Esses índices são o desvio quadrático médio da raiz, *Root Mean Square Deviation* (RMSD) e a métrica de desvio do coeficiente de correlação, *Correlation Coefficient Deviation Metric* (CCDM).

Embora a técnica EMI prova ser uma ferramenta SHM promissora, vários estudos foram publicados com foco nas melhorias da técnica EMI devido à influência do ruído de temperatura e ambiente, o que pode prejudicar a detecção correta de danos (CAMPOS et al., 2019; JIANG; ZHANG; YUXIANG, 2020). Recentemente, Alazzawi e Wang (2020) aplicaram o algoritmo de aprendizado residual para realizar a detecção de danos usando as respostas de impedância do domínio do tempo. Neto, Gallo e Junior (2020) propõem uma compensação de temperatura por uma rede neural convolucional para realizar a detecção correta de danos. Chowdary e Alapati (2021) estudaram efeitos de vibração externa na técnica EMI. Um método de

cointegração para remover os efeitos da temperatura na técnica EMI foi proposto por Li et al. (2019).

Nesse contexto, uma das lacunas de pesquisa que não foi estudada anteriormente é a influência da radiação, que está presente em instalações nucleares, aviões, satélites e outros (UNSCEAR, 2017). De acordo com um relatório do Comitê Científico sobre os efeitos da radiação atômica, outro ambiente de radiação é a exploração de petróleo e gás, onde as técnicas de SHM podem ser usadas para monitorar a integridade dos tubos de metal (UNSCEAR, 2017).

Nesse cenário, embora a técnica EMI usando sensores piezoelétricos tenham sido amplamente utilizadas, o estudo da eficácia de sua aplicação em ambientes radioativos ainda é incipiente e alguns estudos na literatura foram publicados focados em efeitos de radiação apenas no transdutor de cerâmica piezoelétrica (GIURGIUTIU; POSTOLACHE; TUDOSE, 2016; LIN et al., 2013). No entanto, nenhum desses estudos apresenta resultados de como a radiação afeta a detecção de danos estruturais em uma estrutura onde a técnica EMI é aplicada. Com base nessa questão, este trabalho apresenta os efeitos da radiação na detecção de danos usando a técnica EMI e como a radiação afeta os índices de dano CCDM e RMSD.

Esses índices são a base da quantificação de danos e, conforme atestado nos trabalhos já publicados, de Campos et al. (2019) e Li et al. (2019), questões ambientais como temperatura, vibração e ruído podem alterar a identificação de danos e prejudicar a técnica EMI. Como a radiação pode estar presente no ambiente em que as medições de impedância são realizadas, é necessário investigar o efeito desse distúrbio nos índices tradicionais usados para quantificar os danos na técnica EMI.

1.1 Objetivos

O objetivo desta dissertação de mestrado foi analisar os efeitos da radiação na detecção de danos usando a técnica EMI e como a radiação afeta os índices de dano CCDM e RMSD. Essa análise foi feita usando uma barra de alumínio, na qual foram instalados os transdutores piezoelétricos. Para simular os danos, dois ímãs de Neodímio, um na parte superior e outro no lado inferior, foram conectados à estrutura a ser monitorada.

A detecção de danos no método EMI é baseada em um índice de danos que compara a assinatura da impedância da estrutura saudável (medida de referência) com a assinatura da impedância da estrutura danificada. Assim, inicialmente, a assinatura da linha de base foi obtida

sem irradiação e sem danos. Posteriormente, foram realizadas medições com diversas amplitudes irradiação e foram analisados os seus efeitos.

1.2 Justificativas e Motivação

A técnica da impedância EMI tem sido foco de estudo há muitos anos, porém sua aplicação fica limitada no estudo da influência de variáveis físicas como o ruído e temperatura nessas técnicas de monitoramento. No entanto, a aplicabilidade dessas técnicas para aparatos espaciais requer um estudo da influência da radiação nessas técnicas.

A grande vantagem dos sistemas de SHM é proteger estruturas e processos de alguma parada indesejada, promovendo maior vida útil. Sendo que, do ponto de vista científico, é garantir alto nível de segurança e, do econômico, é reduzir os custos com manutenção. A técnica da impedância EMI se destaca por utilizar transdutores leves, finos e baratos que podem ser facilmente instalados, apresentando todas as condições para desenvolvimento de sistemas de SHM. No entanto, como apresentado anteriormente, ainda existem lacunas de pesquisa em relação a influência da radiação em estruturas que devem ser estudados. Portanto, neste trabalho, escolheu-se investigar a influência da radiação na técnica da impedância eletromecânica.

1.3 Organização do Trabalho

Este trabalho está organizado em quatro capítulos, como segue:

- Capítulo 1 – Introdução, objetivos, justificativa e motivação para o desenvolvimento do trabalho.
- Capítulo 2 – Revisão bibliográfica com apresentação do Princípio da Impedância Eletromecânica, Materiais Transdutores Piezoelétricos, Técnica da Impedância Eletromecânica, e Efeito da Radiação Ionizante em Sistemas SHM.
- Capítulo 3 – Apresentação dos materiais e da metodologia usada para analisar os efeitos do ruído e vibrações na detecção de danos.
- Capítulo 4 – Apresentação dos resultados experimentais e a discussão do trabalho.
- Finalmente, são apresentadas as conclusões, perspectivas para trabalhos futuros e a lista de referências bibliográficas utilizadas.

CAPÍTULO 2

Revisão Bibliográfica

2.1 Princípio da Impedância Eletromecânica

A detecção de danos em estruturas é um importante desafio para engenheiros civis e de materiais. A identificação precoce de danos pode prevenir falhas estruturais e garantir a segurança das pessoas, além de economizar recursos financeiros. Uma técnica promissora de detecção de danos é o método da Impedância Eletromecânica (YANG et al., 2012).

O método da Impedância Eletromecânica é uma técnica não invasiva que utiliza sensores colocados na superfície da estrutura para monitorar a resposta elétrica e mecânica da mesma. O método é baseado na relação entre a impedância elétrica e a impedância mecânica da estrutura. Quando a estrutura está intacta, tem-se a impedância de referência, mas quando ocorre um dano, alterações ocorrem na impedância mecânica e elétrica da estrutura, que podem ser detectadas pelos sensores e analisadores. O método da Impedância Eletromecânica pode ser aplicado em diferentes tipos de estruturas, como pontes, edifícios, turbinas eólicas, entre outros (XU; LI; WU, 2012; AL-BADOUR; AL-GHAMDI, 2013).

A técnica pode detectar diferentes tipos de danos, como trincas, corrosão, delaminação, entre outros. Além disso, a técnica pode ser utilizada para monitorar a evolução do dano ao longo do tempo. O método da Impedância Eletromecânica é uma técnica promissora para detecção de danos em estruturas, mas ainda enfrenta desafios para sua implementação em larga escala. Um dos principais desafios é a necessidade de se desenvolver sistemas de monitoramento de baixo custo e de fácil instalação. Além disso, é importante aprimorar as técnicas de análise dos dados coletados pelos sensores para melhorar a precisão da detecção de danos (RANDALL; INMAN; WORDEN, 2012).

2.2 Materiais Transdutores Piezoelétricos

Os materiais piezoelétricos têm a propriedade de converter energia mecânica em energia elétrica (efeito piezoelétrico direto) e energia elétrica em energia mecânica (efeito piezoelétrico reverso) (MEITZLER et al., 1988; BAPTISTA; VIEIRA FILHO, 2009). As relações constitutivas de um material piezoelétrico podem ser determinadas a partir de um capacitor

plano de placas paralelas, no qual são aplicadas uma força e uma diferença de potencial elétrico. Se o dielétrico do capacitor é um material piezelétrico, ocorre uma interação entre as grandezas elétricas e mecânicas, ocasionando o que são conhecidos como efeito piezelétrico direto ou reverso.

Para o efeito piezelétrico que causa a interação mecânica/elétrica ser considerado linear, a amplitude do campo elétrico causado pela diferença de potencial deve ser suficientemente baixa. Neste caso, as seguintes relações constitutivas podem ser determinadas a partir da energia livre de Gibbs do material

$$D_m = d_{m\beta}^{H,\theta} T_\beta + \varepsilon_{mk}^{T,H,\theta} E_k + m_{mk}^{T,\theta} H_k + p_m^{T,H} d\theta \quad (1)$$

$$S_\alpha = s_{\alpha\beta}^{E,H,\theta} T_\beta + d_{\beta m}^{H,\theta} E_m + d_{\beta m}^{E,\theta} H_m + \alpha_\alpha^{E,H} d\theta \quad (2)$$

Nas Equações (1) e (2), $d_{m\beta}$ e $d_{\beta m}$ são as constantes piezelétricas, m_{mk} são as constantes magnetodielétricas, p_m são as constantes piroelétricas, α_α são os coeficientes de expansão térmica, H_k e H_m são as componentes de campo magnético, θ é a temperatura, S_α é o tensor de deformação mecânica (strain), T_β é o tensor de tensão mecânica (stress), $s_{\alpha\beta}$ é o tensor de elasticidade do material, também conhecido como tensor de *compliance*, E é o campo elétrico, D_m é o deslocamento elétrico e ε_{mk} é o tensor de segunda ordem que representa as constantes de permissividade dielétrica do material. Os sobrescritos E , H , θ e T indicam campo elétrico, campo magnético, temperatura e tensão mecânica constantes, respectivamente. Considerando-se a simetria dos tensores, tem-se que $\alpha, \beta = 1, 2, \dots, 6$ e $m, k = 1, 2, 3$

Na detecção de danos estruturais e geração de energia, os efeitos térmicos e magnéticos são usualmente desprezados e as Equações (1) e (2) podem ser reescritas como

$$D_m = d_{m\beta} T_\beta + \varepsilon_{mk}^T E_k \quad (3)$$

$$S_\alpha = s_{\alpha\beta}^E T_\beta + d_{\beta m} E_m \quad (4)$$

A Equação (3) representa o efeito piezelétrico direto, em que uma tensão mecânica T_β no material causa um deslocamento elétrico D_m . Já no efeito piezelétrico reverso representado pela Equação (4), a aplicação de um campo elétrico E_m causa uma correspondente deformação mecânica S_α .

Na detecção de danos estruturais, os transdutores piezelétricos mais utilizados são constituídos de cerâmicas de PZT (*Pb-lead Zirconate Titanate* – Titanato Zirconato de Chumbo). Essas cerâmicas têm a simetria dos cristais hexágonos da classe *6mm*. Utilizando-se essa simetria e considerando-se apenas a deformação longitudinal e transversal ($\alpha, \beta = 1, 2, 3$), as Equações (3) e (4) podem ser desenvolvidas como segue

$$D_3 = d_{31}(T_1 + T_2) + d_{33}T_3 + \varepsilon_{33}^T E_3 \quad (5)$$

$$S_1 = s_{11}^E T_1 + s_{12}^E T_2 + s_{13}^E T_3 + d_{31} E_3 \quad (6)$$

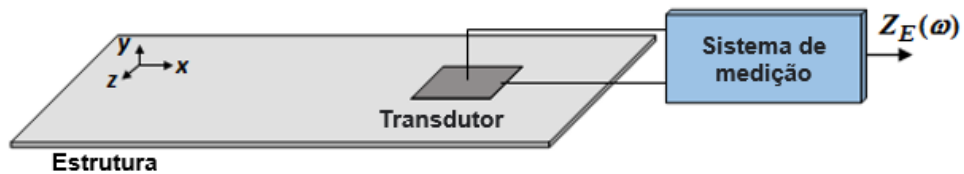
$$S_2 = -s_{12}^E T_1 - s_{11}^E T_2 + s_{13}^E T_3 + d_{31} E_3 \quad (7)$$

$$S_3 = s_{12}^E (T_1 + T_2) + s_{33}^E T_3 + d_{33} E_3 \quad (8)$$

2.3 A Técnica da Impedância Eletromecânica

Das técnicas de SHM existentes, utilizou-se neste trabalho a técnica da impedância eletromecânica. O princípio da técnica da Impedância Eletromecânica é baseado na interação eletromecânica entre a impedância mecânica da estrutura a ser monitorada e a impedância elétrica do sensor piezelétrico que está colado na estrutura (VISALAKSHI; BHALLA; GRUPTA, 2018; ALBAKRI; TARAZAGA, 2017; FREITAS; BAPTISTA, 2016). O modelo básico é apresentado na Figura 1.

Figura 1 – Princípio básico da impedância EMI.



Fonte: Próprio Autor

O sistema de medição estimula o transdutor piezelétrico através de um sinal de excitação com uma frequência apropriada (ω) e monitora o sinal de resposta correspondente, simultaneamente, apresentando como resultado a impedância elétrica ($Z_E(\omega)$) do transdutor. Como a espessura do transdutor é na ordem de frações de milímetros, a deformação na direção

de sua espessura (eixo y da Figura 1) é pouco expressiva. Além disso, para uma suposição unidimensional, pode-se considerar apenas a deformação na direção do eixo x do material. Portanto, o principal modo de propagação é na direção do eixo x e pode-se fazer $S_2 = S_3 = T_2 = T_3 = 0$ nas Equações (5) a (8). Logo, as equações piezelétricas para esse modo de propagação ficam

$$D_3 = d_{31}T_1 + \varepsilon_{33}^T E_3 \quad (9)$$

$$S_1 = s_{11}^E T_1 + d_{31} E_3 \quad (10)$$

Dessa forma, a impedância elétrica do transdutor pode ser determinada como [3]

$$Z_E(\omega) = \frac{1}{j\omega C} \left(1 - \frac{d_{31}^2}{s_{11}^E \varepsilon_{33}^T} \frac{Z_S(\omega)}{Z_S(\omega) + Z_P(\omega)} \right)^{-1} \quad (11)$$

sendo que $Z_E(\omega)$ é a impedância elétrica do transdutor na frequência angular ω , C é a capacitância estática do transdutor, $Z_P(\omega)$ é a impedância mecânica do transdutor, $Z_S(\omega)$ é a impedância mecânica da estrutura monitorada, d_{31} é a constante piezelétrica, s_{11}^E é a *compliance* no campo elétrico constante, ε_{33}^T é a constante dielétrica em tensão mecânica constante, e j é a unidade complexa.

De acordo com a Equação (11), qualquer variação na impedância mecânica Z_S da estrutura, causada por algum dano, tal como trincas e corrosões, implica em uma variação correspondente na impedância elétrica Z_E do transdutor. Geralmente, a medição da impedância elétrica é feita por analisadores de impedância comerciais que, por se tratar de instrumentos caros, pesados e, muitas vezes com recursos que são indiferentes às necessidades dos sistemas SHM, não apresentam a versatilidade de novos e alternativos sistemas que têm sido desenvolvidos. Para este trabalho, o sistema utilizado para a medição da impedância elétrica foi o proposto por Baptista e Vieira Filho (2009).

Portanto, um dano estrutural pode ser detectado e quantificado por meio da medição e análise da impedância elétrica do transdutor. Tipicamente, esta verificação é realizada através de índices de falha métrica, comparando-se duas curvas de impedância elétrica. A curva de impedância utilizada como referência (*baseline*) deve ser da estrutura íntegra, sem danos,

enquanto a outra curva de impedância é referente a um momento de monitoramento da estrutura. Para este trabalho, o índice utilizado para a caracterização de danos é o desvio do coeficiente de correlação, *correlation coefficient deviation metric* (CCDM) e o desvio quadrático médio da raiz, *Root Mean Square Deviation* (RMSD) (GORDIN; LUO; WU, 2020), que é calculado, respectivamente, da seguinte forma

$$CCDM = 1 - \frac{\sum_{k=\omega_I}^{\omega_F} [Z_{E,H}(k) - \bar{Z}_{E,H}] [Z_{E,D}(k) - \bar{Z}_{E,D}]}{\sqrt{\sum_{k=\omega_I}^{\omega_F} [Z_{E,H}(k) - \bar{Z}_{E,H}]^2} \sqrt{\sum_{k=\omega_I}^{\omega_F} [Z_{E,D}(k) - \bar{Z}_{E,D}]^2}} \quad (12)$$

e

$$RMSD = \sum_{k=\omega_I}^{\omega_F} \sqrt{\frac{[Z_{E,D}(k) - Z_{E,H}(k)]^2}{Z_{E,H}^2(k)}} \quad (13)$$

sendo que $Z_{E,H}(k)$ e $Z_{E,D}(k)$ são os sinais de impedância elétrica (amplitude, parte real ou parte imaginária), como dado pela Equação (11), com a estrutura na condição íntegra e danificada, respectivamente, medidas na frequência k variando da frequência inicial ω_I até a frequência final ω_F , e $\bar{Z}_{E,H}(k)$ e $\bar{Z}_{E,D}(k)$ são seus valores médios.

Embora os trabalhos citados anteriormente mostrem os efeitos da radiação nas frequências ressonantes do transdutor, ainda não existe análise desses efeitos quando o transdutor está acoplado às estruturas e seu reflexo no índice utilizado para caracterização de danos. Sob efeito de radiação, a variação da impedância do transdutor pode ocasionar uma variação no índice CCDM, prejudicando a efetividade do sistema de monitoramento baseado na impedância eletromecânica.

2.4 Efeito da Radiação Ionizante em Sistemas SHM

Atualmente, os desafios científicos e tecnológicos dos sistemas em SHM estão alicerçados no estudo da influência de várias variáveis físicas como o ruído e temperatura nessas técnicas de monitoramento (CAMPOS et al., 2019; CASTRO; BAPTISTA; CIAMPA, 2019).

Muitos trabalhos vêm sendo realizados nesse sentido. No entanto, a aplicabilidade dessas técnicas para aparatos espaciais requer um estudo da influência da radiação nessas técnicas. Nesse sentido, esse trabalho visou o estudo da influência da radiação na técnica da impedância eletromecânica.

Radiação pode ser classificada em não-ionizante e ionizante. A radiação não-ionizante é a radiação de baixa energia transferida por meio de ondas eletromagnéticas de baixa frequência ou calor que não modifica a matéria. A radiação ionizante é a radiação de alta energia transferida por meio de partículas como a partícula alfa, partícula beta ou nêutrons e por meio de onda eletromagnética de alta energia como a radiação gama que interagem com a matéria ionizando átomos. Radiação do tipo Alfa é transmitida por partículas constituídas por 2 prótons e 2 nêutrons, ou seja, um átomo de Hélio (He).

A radiação alfa pode ser bloqueada por folhas de papel e não conseguem atravessar as camadas de células mortas da pele humana. A radiação do tipo Beta é transmitida por elétrons resultante da decomposição de nêutrons em prótons+elétrons+antineutrino no núcleo de átomos instáveis e atravessam lâminas de chumbo com 2 mm de espessura ou lâminas de alumínio de 5 mm de espessura. Radiação gama é formada por onda eletromagnética com comprimento de onda variando de $0,5 \text{ \AA}$ a $0,005 \text{ \AA}$. A radiação gama é mais perigosa pois possuem alto grau de penetração conseguindo atravessar chapas de aço de até 15 cm.

Uma excelente revisão sobre o estudo do efeito de radiação em sensores piezelétricos e sistemas SHM pode ser encontrada em (GIURGIUTIU, 2016). BROOMFIELD (1980) realizou pesquisas iniciais examinando o efeito da irradiação de nêutrons de baixa fluência nas cerâmicas piezoelétricas com eletrodo de prata e descobriu que a irradiação aumentou as frequências ressonantes no modo de espessura e diminuiu o acoplamento eletromecânico da temperatura elevada. Esse efeito foi atribuído à redução da polarização piezocerâmica e a alterações na ligação do eletrodo de prata.

Lin et al. (2012) realizaram experimentos de exposição à irradiação em ressonadores, sensores ativos de pastilhas piezoelétrica, *Piezoelectric Wafer Active Sensors* (PWAS). A dose absorvida variou de 3 a 50 Mrad (30 a 500 kGy), onde foi utilizada uma fonte gama Co-60 com uma taxa de dose máxima de $2,5 \text{ Mrad h}^{-1}$ (25 kGy h^{-1}). A taxa de dose absorvida foi calculada em aprox. $1,55 \text{ MRad h}^{-1}$ ($15,5 \text{ kGy h}^{-1}$) com tempos de exposição de 2, 4 e 8 h. As medidas EMI foram realizadas para vibração no plano e fora do plano (modo de espessura). Foram utilizados ressonadores PWAS livres e com fio.

Este trabalho exploratório citado mostrou que o PWAS suportou bem à irradiação e manteve com sucesso sua funcionalidade. Algumas mudanças no espectro EMI foram observadas, especialmente para os ressonadores PWAS com fio. Essas mudanças consistiram em pequenas mudanças no espectro em direção a frequências mais altas e valores de impedância mais altos. Também foi observado que a irradiação diminuiu a capacitância elétrica medida com um instrumento multímetro padrão. Conforme sugerido por Broomfield (1980), os efeitos observados foram atribuídos a uma alteração na ligação do eletrodo e uma redução na polarização da cerâmica.

Giurgiutiu et al. (2016) também apresentaram pesquisa sobre os efeitos da radiação, temperatura e condições de vácuo em transdutores piezelétricos em aplicações espaciais. A radiação cósmica foi simulada com campos de radiação γ emitidos por fontes radioativas de ^{60}Co . As experiências foram conduzidas em uma câmara de irradiação gama 5000 (figura 2 (c)), que é um irradiador gama cobalto-60 compacto e auto-blindado, fornecendo um volume de irradiação de aproximadamente 5000 centímetro cúbico (cm^3). O material para irradiação é colocado em uma câmara de irradiação localizada na gaveta vertical dentro do balão de chumbo.

Essa gaveta pode ser movida para cima e para baixo com a ajuda de um sistema de acionadores motorizados que permite o posicionamento preciso da câmara de irradiação no centro do campo de radiação que é fornecido por um conjunto de fontes estacionárias Co-60 colocadas em uma gaiola cilíndrica. As fontes são duplamente encapsuladas em lápis de aço inoxidável resistentes à corrosão. Um mecanismo para rotação / agitação de amostras durante a irradiação também é incorporado.

A blindagem de chumbo fornecida ao redor da fonte é adequada para manter o campo de radiação externa bem dentro dos limites permitidos. As doses de irradiação desejadas foram calculadas usando os seguintes dados da literatura: (a) a dose total estimada para uma missão a Marte (por um período de atividade solar mínima) é de 110 mGy/ano em média, portanto, uma taxa de dose de cerca de 15 $\mu\text{Gy/h}$; e (b) as maiores doses totalmente absorvidas determinadas pelas sondas espaciais Pioneer 10 e 11 durante todo o vôo e o cruzamento de áreas de alto risco foram 15 e 4,3 kGy, respectivamente. Portanto, a taxa de dose determinada pela Câmara 5000 de irradiação gama foi considerada representativa. A dose absorvida foi fixada em 23,5 kGy completos, o que corresponde a 5 h de exposição na taxa de dose medida de 4,7 kGy h⁻¹.

Haider et al. (2018), apresentaram estudo do efeito de radiação gama em sensores piezelétricos aplicados em sistemas de monitoramento de integridade de estrutura (SHM). Nos experimentos utilizou-se radiação gama proveniente de uma fonte Co-60 iniciando com uma

taxa de 0.1 Gy/h por 20 horas e depois aumentando para taxa de 1.233 kGy/h por 32 horas. A dose total acumulada foi de 40,7 kGy.

Embora os trabalhos citados anteriormente apresentem estudos do efeito de radiação em sensores piezoelétricos, seus efeitos acoplados em estruturas para análise de integridade ainda não foram avaliados. Neste estudo propõe-se analisar o efeito da radiação em sensores piezoelétricos aplicados em SHM nos quais operam acoplados nas estruturas.

CAPÍTULO 3

Materiais e Métodos

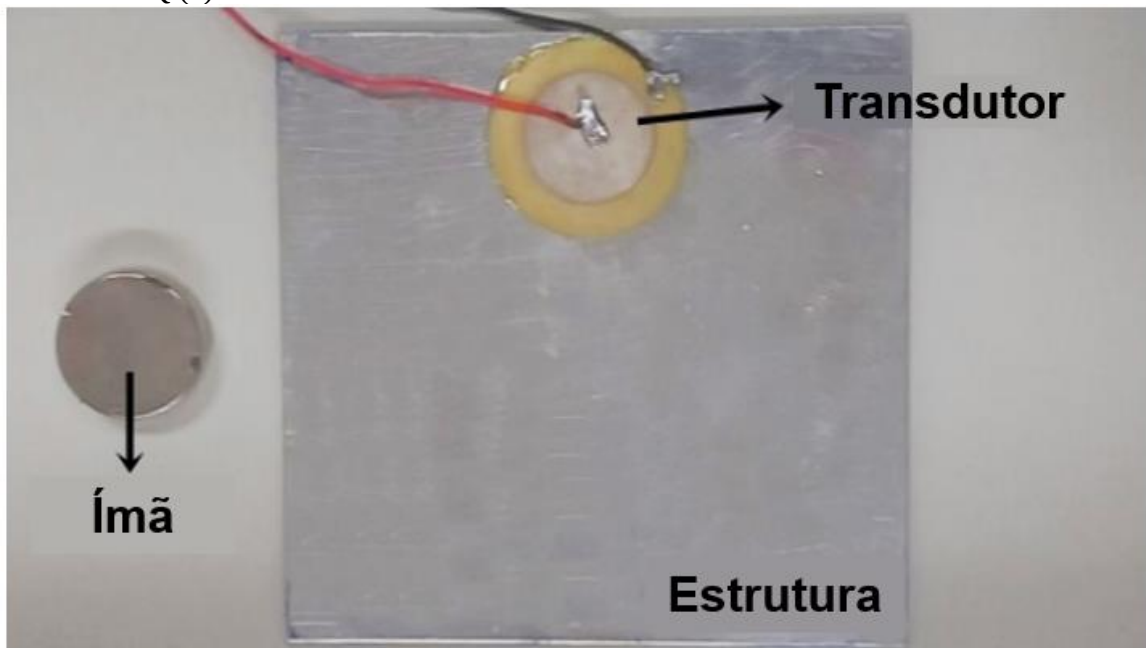
Para avaliar os efeitos da radiação na técnica EMI, foram realizados experimentos com uma placa de alumínio (85 mm x 85 mm x 1 mm). Os transdutores anexados foram o diafragma piezoelétrico de 7BB-20-6, fabricado pela Murata Electronics North America, Inc. (Smyrna, GA, EUA), com uma placa de latão circular com dimensões 20 mm x 0,2 mm e uma cerâmica piezoelétrica circular com dimensões 14 mm x 0,22 mm.

Como a espessura do transdutor é muito pequena em comparação com seu diâmetro, a vibração é predominantemente no modo radial. Para simular os danos, dois ímãs de Neodímio, um na parte superior e outro no lado inferior, foram conectados à estrutura do hospedeiro. A impedância do transdutor foi medida usando um dispositivo de aquisição de dados (DAQ) (NI USB-6211) com uma taxa de amostragem de 250 kHz. Um aplicativo LabVIEW forneceu o cálculo de impedância de acordo com o circuito apresentado em Castro, Baptista e Ciampa. (2019). O transdutor foi excitado usando um sinal de chirp com amplitude de 1 V em uma faixa de frequência de 0 a 65 kHz com um passo de frequência de 2 Hz. Mostra-se na Figura 2 a configuração experimental.

A detecção de danos no método EMI é baseada em um índice de danos que compara a assinatura da impedância da estrutura íntegra (medida de referência) com a assinatura da impedância da estrutura danificada. Assim, inicialmente, a assinatura de referência foi obtida sem irradiação e sem danos. Posteriormente, foram realizadas medições com irradiação de 0 kGy a 60 kGy em etapas de 10 kGy. A irradiação foi feita usando uma célula gama cuja pequena câmara limitou o tamanho da placa. A Figura 3 resume a metodologia proposta. A célula gama (Figura 2c) permite definir o tempo de exposição que deve ser calculado de acordo com a taxa de radiação da fonte e a dose total desejada.

De acordo com a taxa de radiação da célula gama, foram necessárias 12 horas de irradiação para obter a dose total de 10 kGy. Portanto, cada etapa durou 12 horas de irradiação para acumular 10 kGy em cada etapa da configuração experimental. Esses valores são compatíveis com a aplicação de SHM no sistema de armazenamento fundido seco, de acordo com Giurgiutiu, Postolache e Tudose (2016). Como a radiação é cumulativa e o objetivo é avaliar como o nível de radiação pode interferir nos ímãs de neodímio de identificação de falhas emulou a mesma variação de massa para cada nível de radiação.

Figura 2: (a) Placa de Alumínio e Imã de Neodímio (b) notebook com aplicativo do LabVIEW e sistema DAQ (c) Célula Gama.



(a)

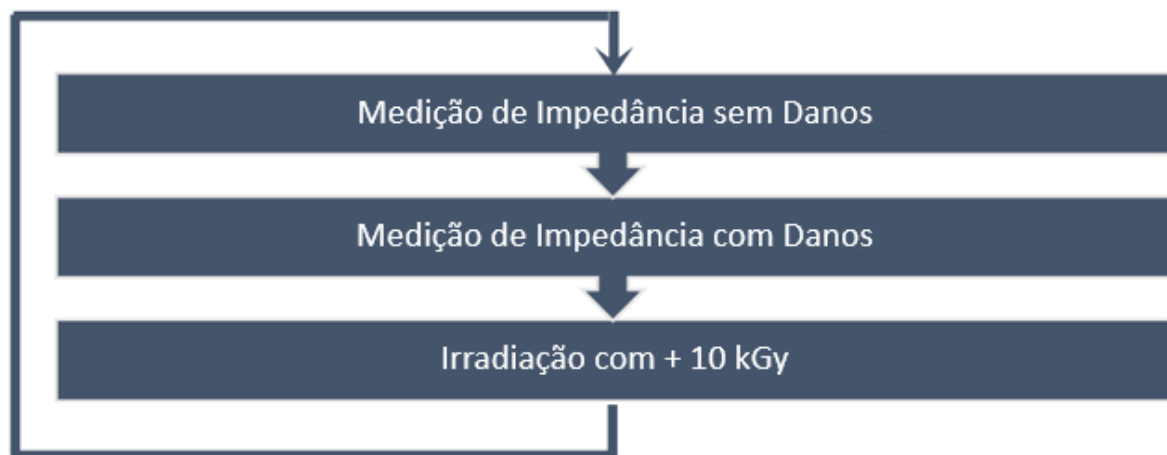


(b)



(c)

Figura 3: Metodologia das Medidas Experimentais.



CAPÍTULO 4

Resultados e Discussão

4.1 Baseline e Índices sem Dano sob Efeito da Radiação

A Figura 4 destaca os efeitos da radiação na parte real da impedância de 2 kHz a 10 kHz. A assinatura da impedância mudou com a dose de radiação desde que os picos diminuem com a dose de radiação. Nesse contexto, quando a extração da referência *baseline* e uma medição de impedância não danificada são contaminadas com a radiação, essas mudanças refletem nos índices de CCDM e RMSD, como mostrado nas Figuras 5 a 11, que avaliam os dois índices em 7 faixas de frequência diferentes de impedância: 2 kHz para 10 kHz, 10 kHz a 20 kHz, 20 kHz a 30 kHz, 30 kHz a 40 kHz, 40 kHz a 50 kHz, 50 kHz a 65 kHz e 0 kHz a 65 kHz, respectivamente. Todos os índices foram calculados usando a parte real da impedância.

Figura 4: Assinatura de Impedância (parte real) para diferentes níveis de radiação.

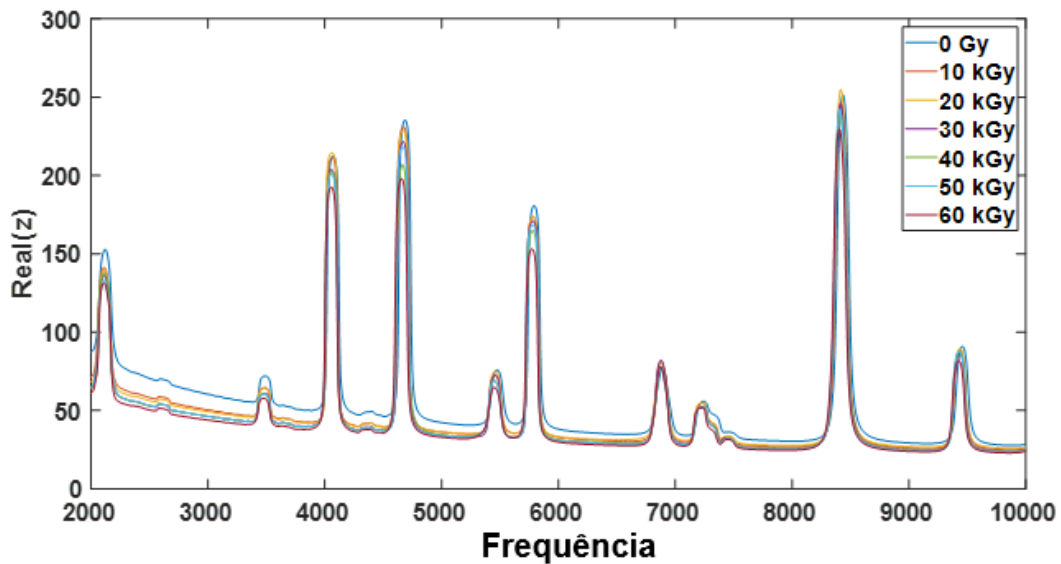
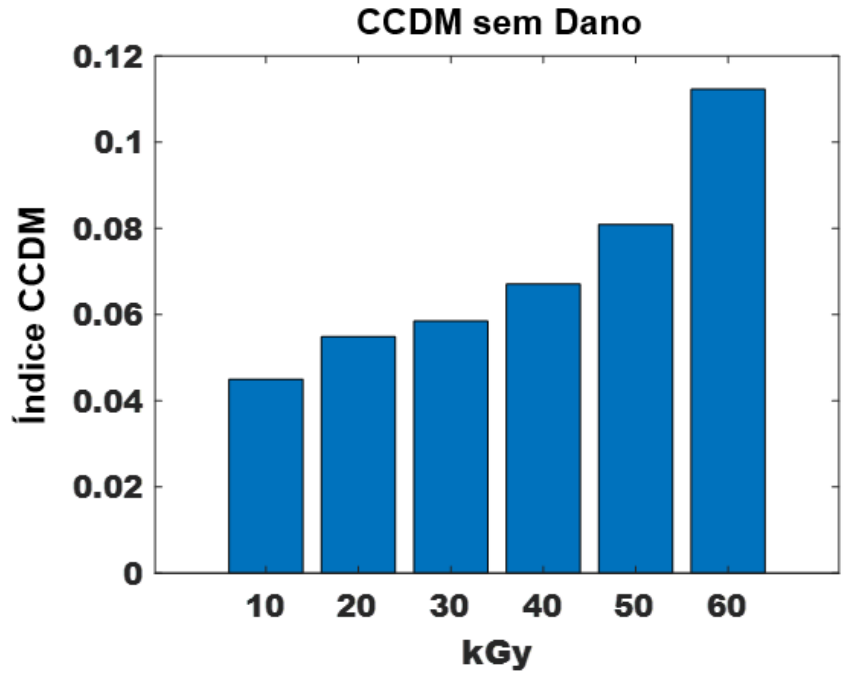
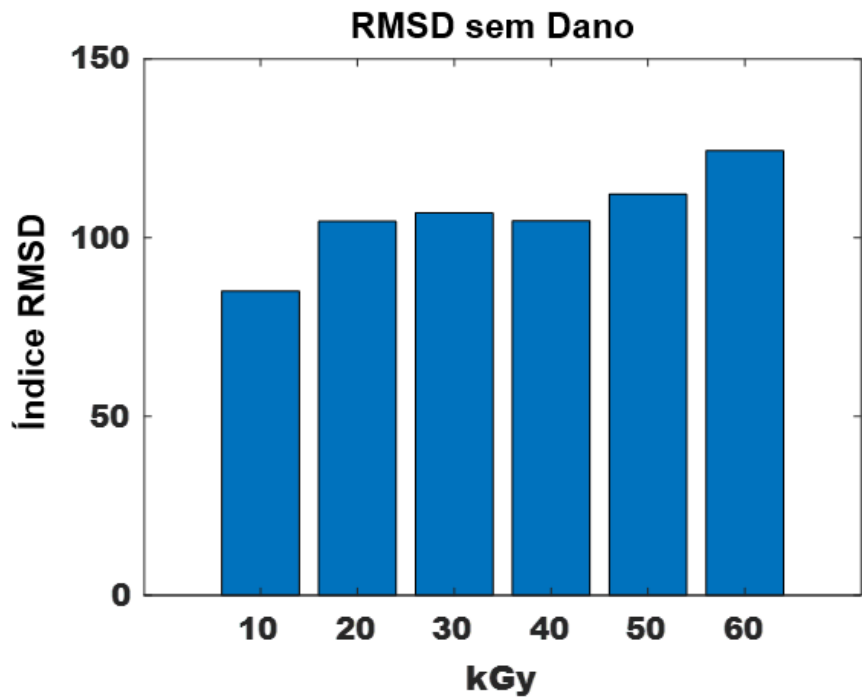


Figura 5: Índices CCDM (a) e RMSD (b) sem dano na faixa de frequência de 2 kHz à 10 kHz.

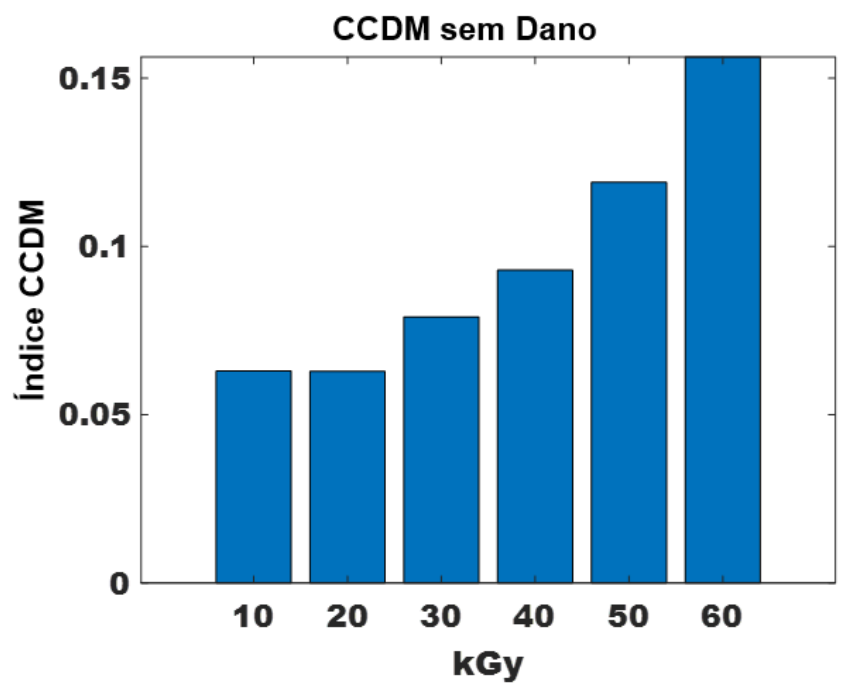


(a)

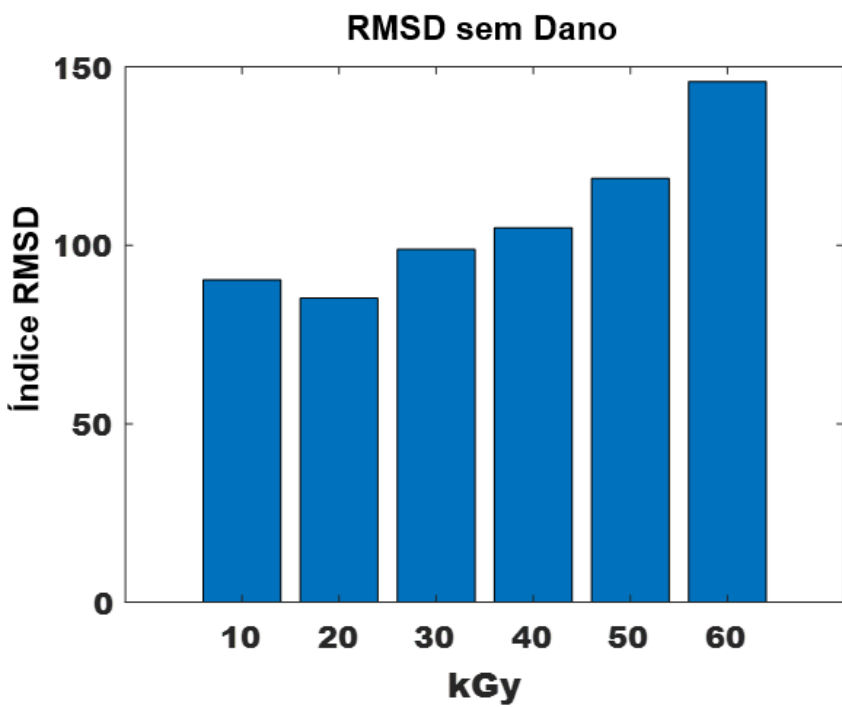


(b)

Figura 6: Índices CCDM (a) e RMSD (b) sem dano na faixa de frequência de 10 kHz à 20 kHz.



(a)



(b)

Figura 7: Índices CCDM (a) e RMSD (b) sem dano na faixa de frequência de 20 kHz à 30 kHz.

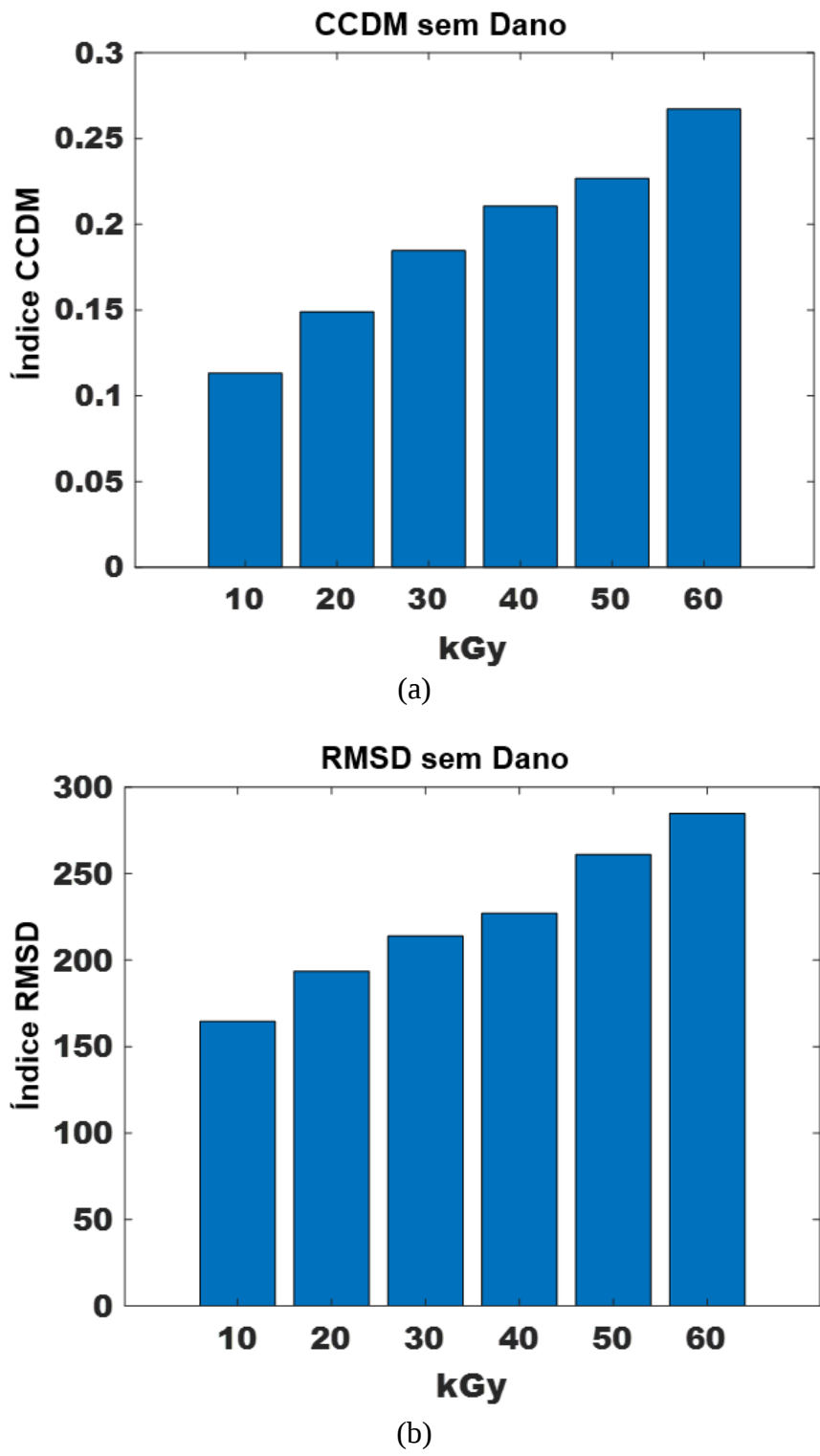
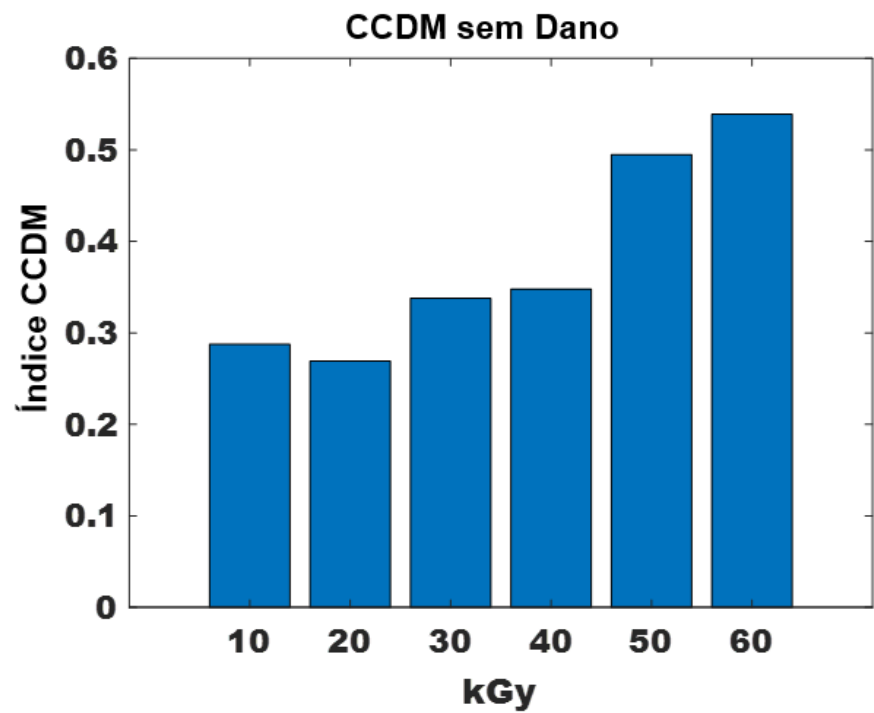
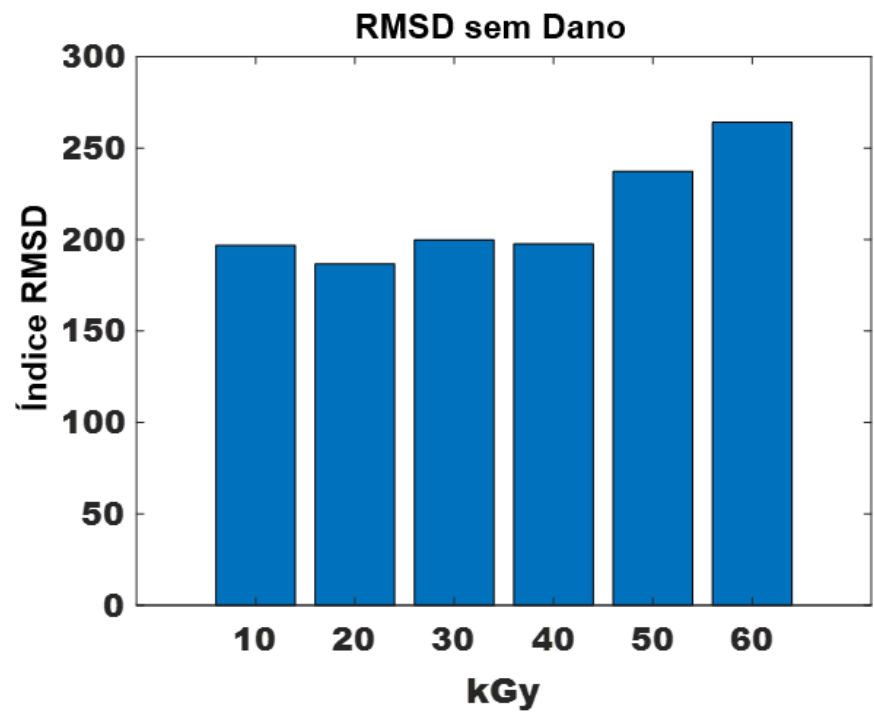


Figura 8: Índices CCDM (a) e RMSD (b) sem dano na faixa de frequência de 30 kHz à 40 kHz.



(a)



(b)

Figura 9: Índices CCDM (a) e RMSD (b) sem dano na faixa de frequência de 40 kHz à 50 kHz.

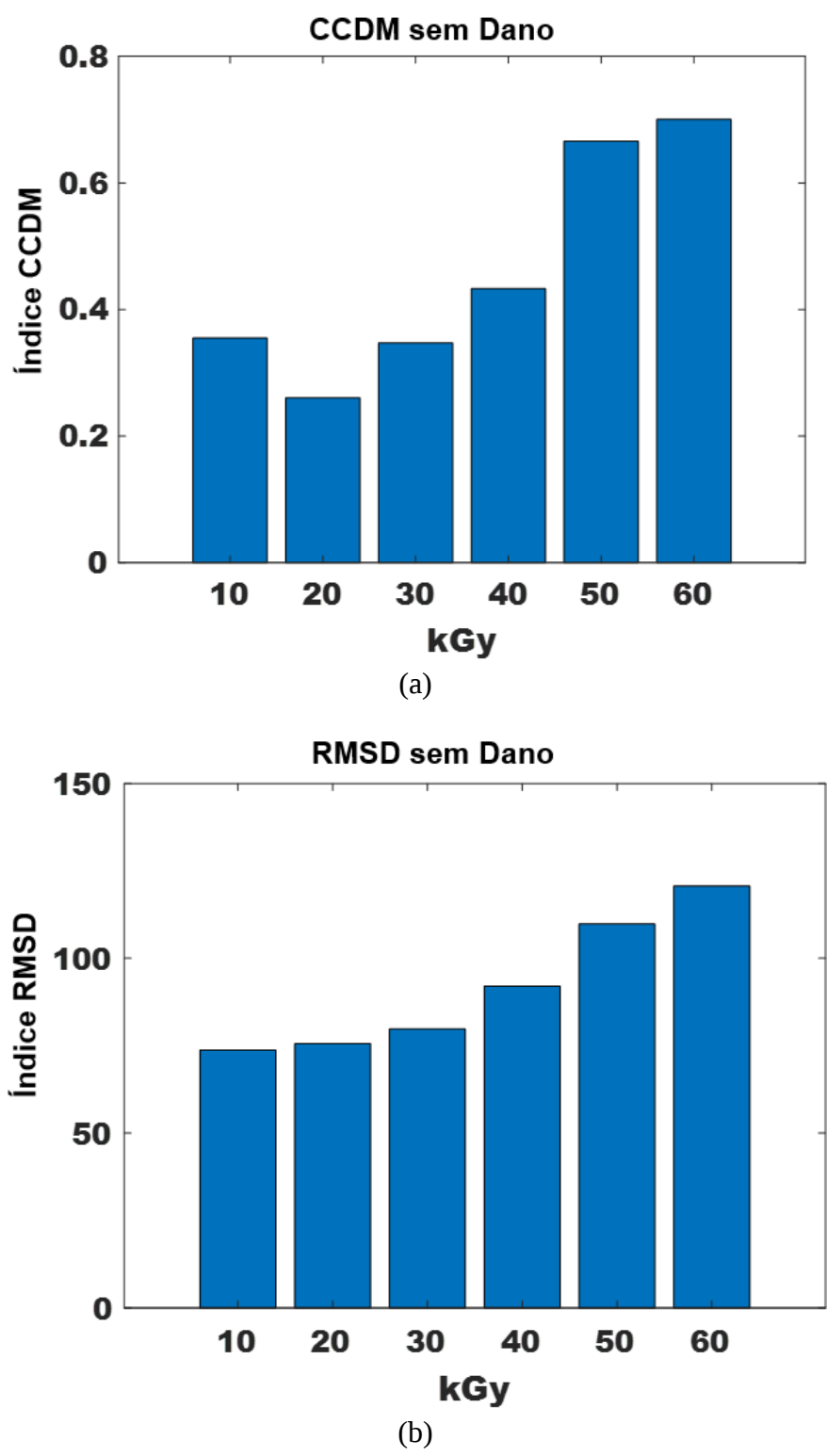
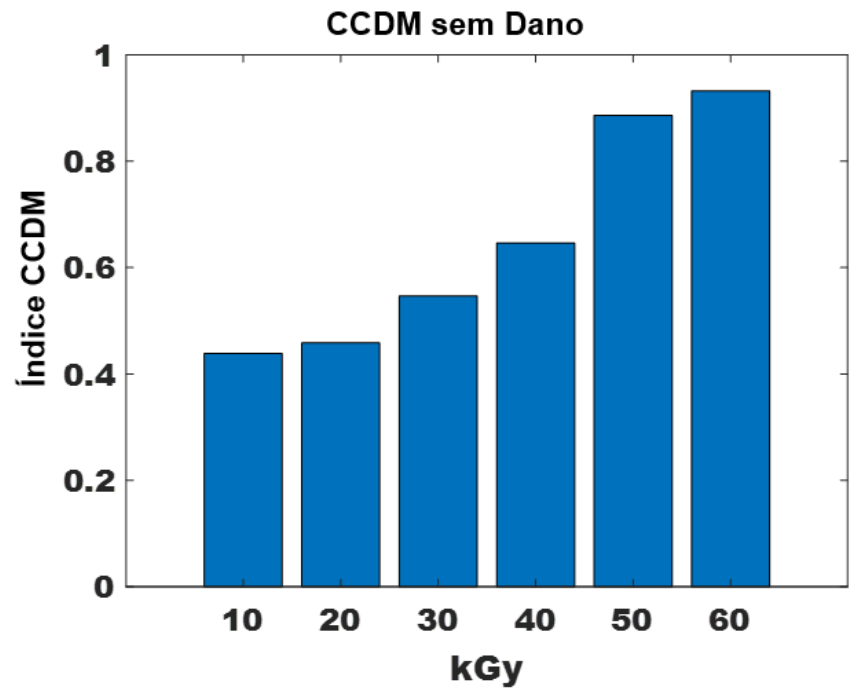
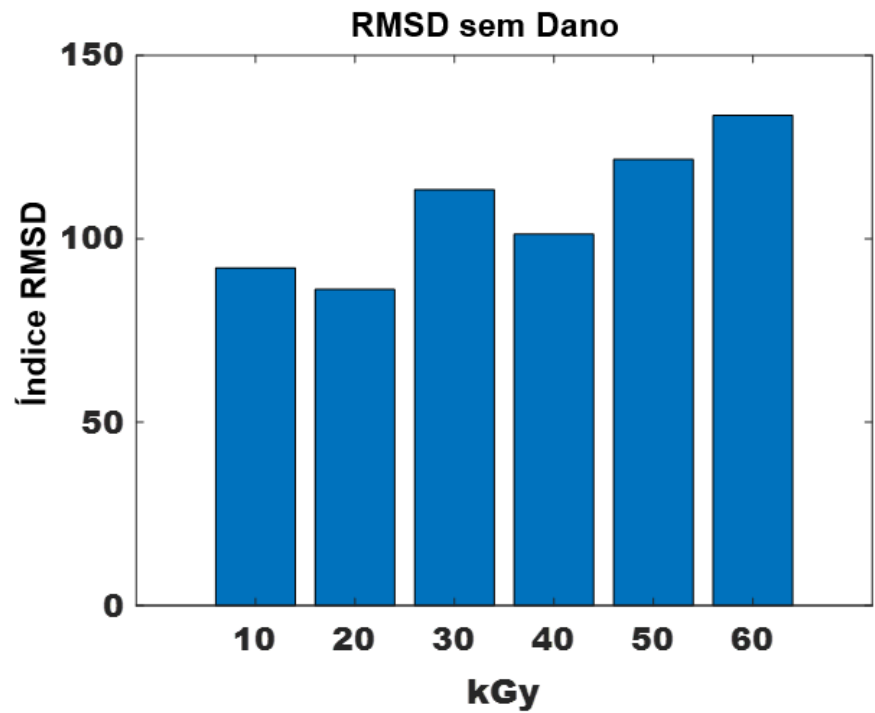


Figura 10: Índices CCDM (a) e RMSD (b) sem dano na faixa de frequência de 50 kHz à 65 kHz.

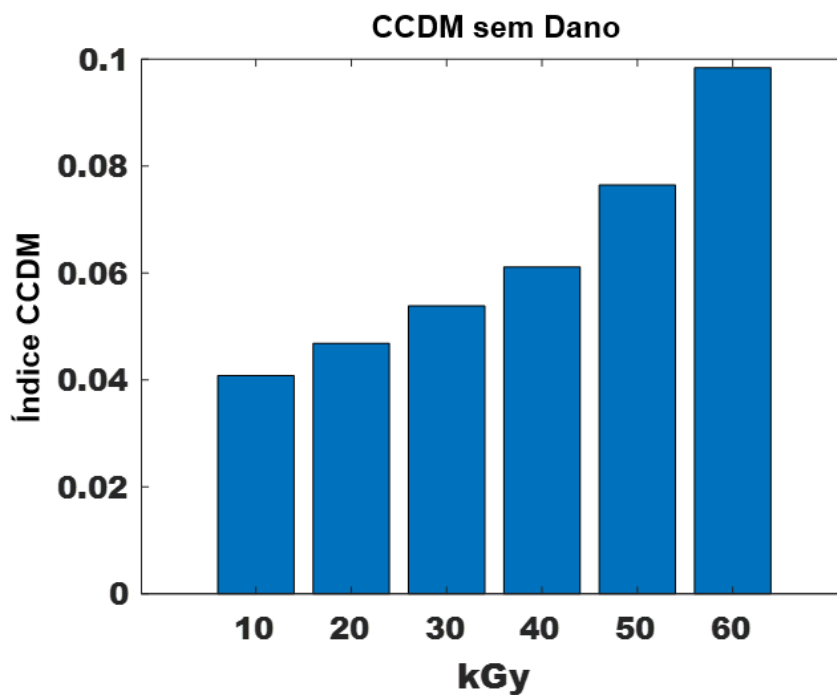


(a)

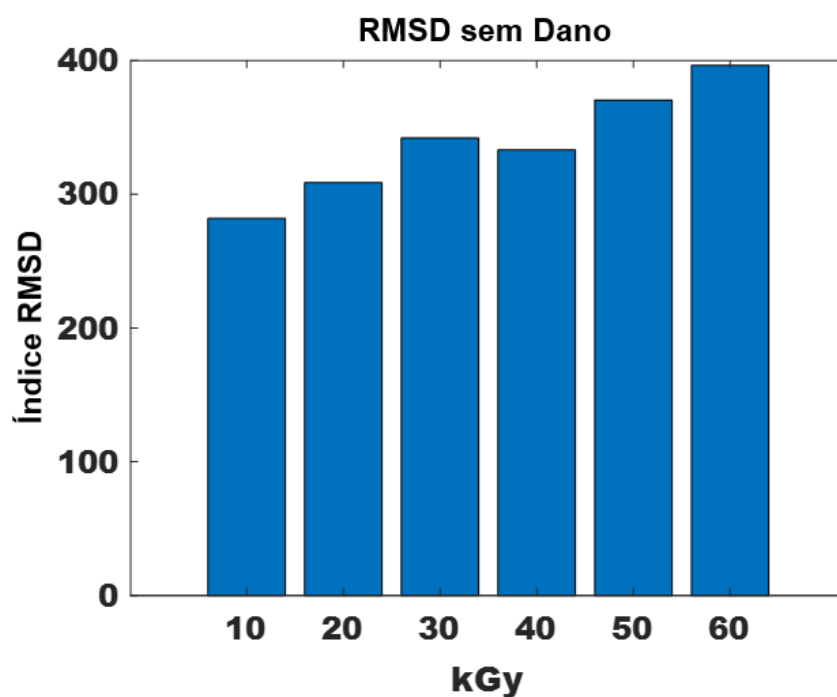


(b)

Figura 11: Índices CCDM (a) e RMSD (b) sem dano na faixa de frequência de 0 kHz à 65 kHz.



(a)



(b)

Em geral, os índices aumentam em função da radiação. Na faixa de frequência de 0 kHz a 10 kHz, o CCDM variou de 0,04 a 0,115 (Figura 5a) e o RMSD de 80 a 120 (Figura 5b),

considerando a variação percentual, o CCDM aumentou 187,5 % e o RMSD em 50 % correspondentemente a um aumento na radiação de 10 kGy para 60 kGy.

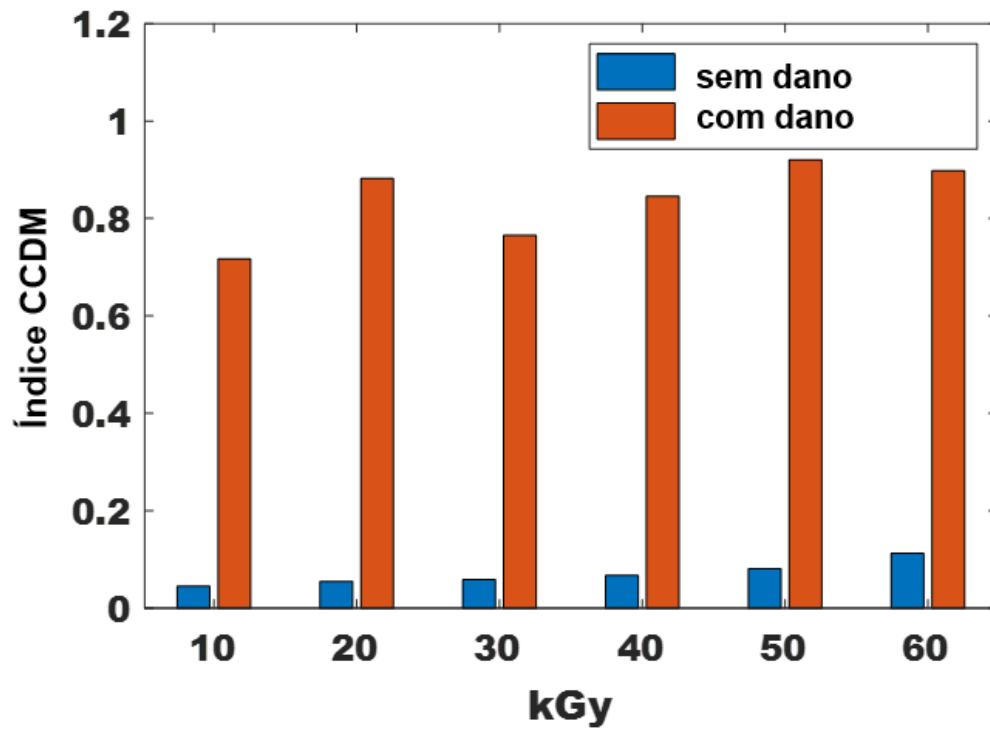
Em relação à próxima faixa de frequência (10 kHz - 20 kHz), o CCDM aumentou de 0,06 para 0,16 (Figura 6a) e o RMSD de 90 a 145 (Figura 6b), o que significa que o incremento da dose de irradiação se torna índices 167 % e 61 % mais sensibilidade à radiação, respectivamente. Na faixa de frequência de 20 kHz a 30 kHz, o CCDM aumentou 57,7 % de 0,11 para 0,26 (Figura 7a) e o RMSD 75 % de 160 a 280 (Figura 7b).

Na faixa de frequência de 30 kHz a 40 kHz, o CCDM variou de 0,3 a 0,55 (Figura 8a) e o RMSD de 200 a 260 (Figura 8b). Nesse sentido, o CCDM aumentou 83 % e RMSD em 30 %. Em relação à faixa de 40 kHz a 50 kHz, o CCDM variou de 0,25 a 0,7 (Figura 9a), o que significa um incremento de 64,2 %, e o RMSD variou de cerca de 70 a 120 (Figura 9b), em outras palavras, um incremento de 71,4 %. Na faixa de frequência de 50 kHz a 65 kHz, o CCDM varia de 0,4 a 0,9 (Figura 10a) e o RMSD varia de 80 a 130 (Figura 10b). Portanto, o CCDM aumentou 125 % e o RMSD em 62,5 % correspondentemente a um aumento na radiação de 10 kGy para a irradiação total de 60 kGy. Para a faixa de impedância completa (0 kHz - 65 kHz), o CCDM variou de 0,04 a 0,1 (Figura 11a) e o RMSD variou de cerca de 290 a 400 (Figura 11b). Esses incrementos foram, respectivamente, 60 % e 37,9 %.

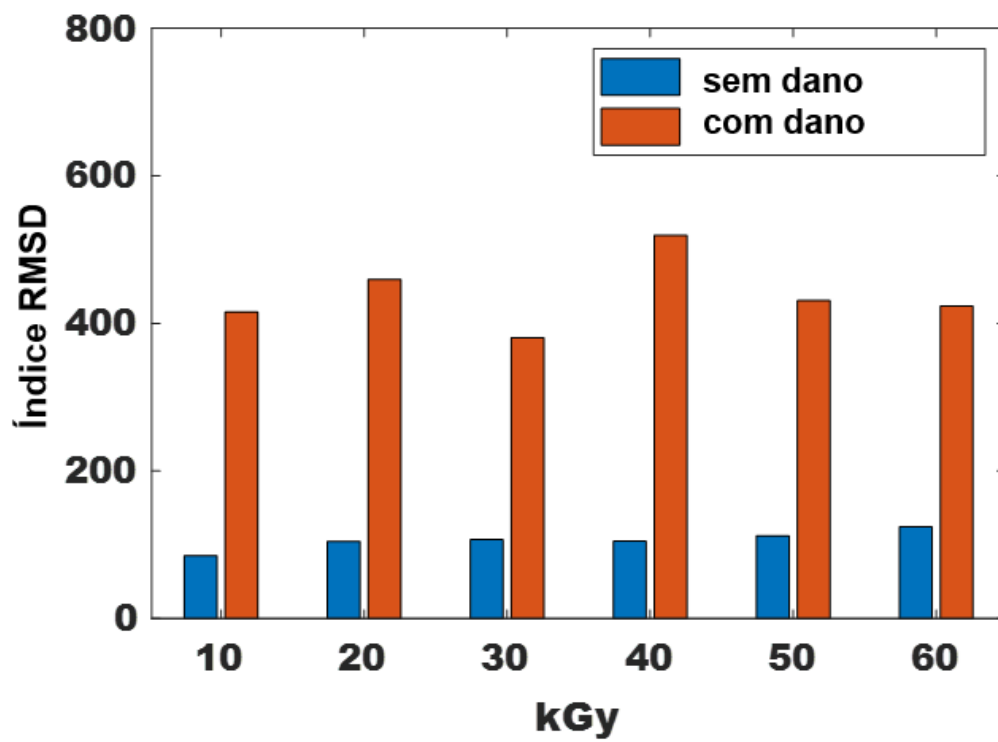
4.2 Índices CCDM e RMSD com Dano sob Efeito da Radiação

As Figuras 12 a 18 mostram os resultados dos índices CCDM e RMSD obtidos sob efeitos de radiação e para a estrutura com e sem danos para os intervalos de frequência estudados anteriormente.

Figura 12: Índices CCDM (a) e RMSD (b) na faixa de frequência de 2 kHz to 10 kHz.

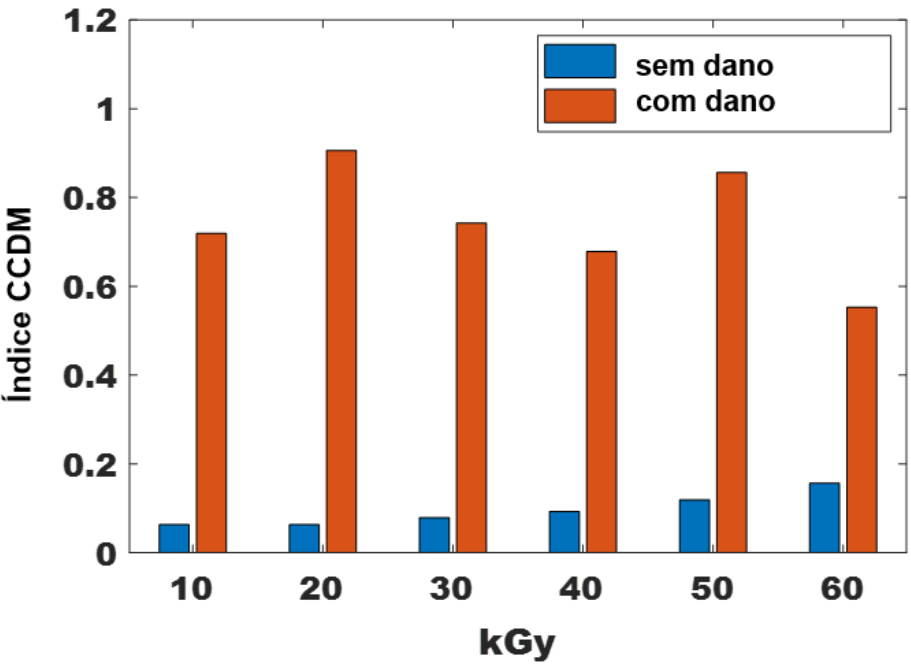


(a)

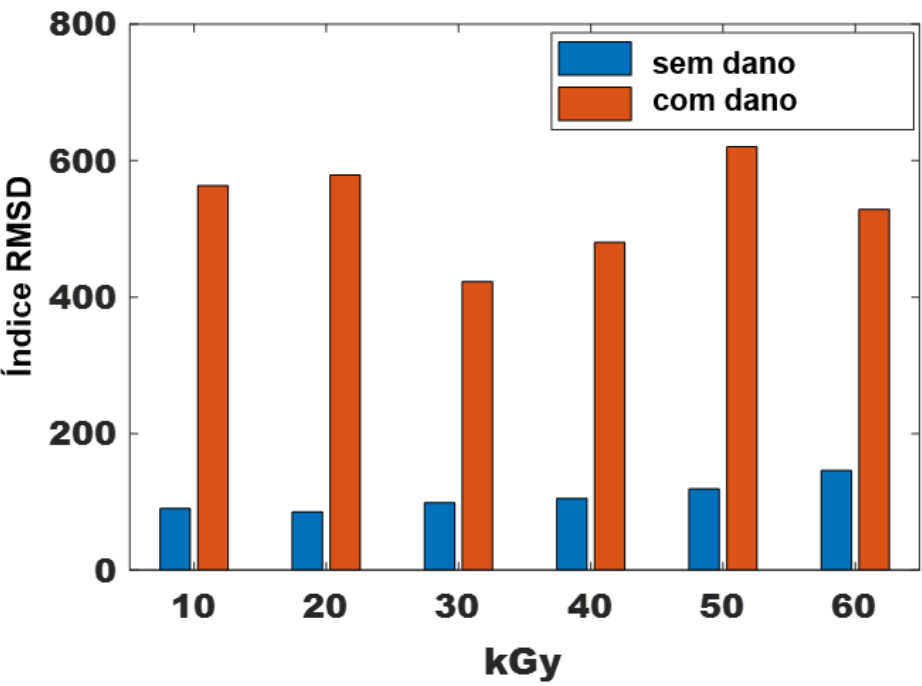


(b)

Figura 13: Índices CCDM (a) e RMSD (b) na faixa de frequência de 10 kHz to 20 kHz.

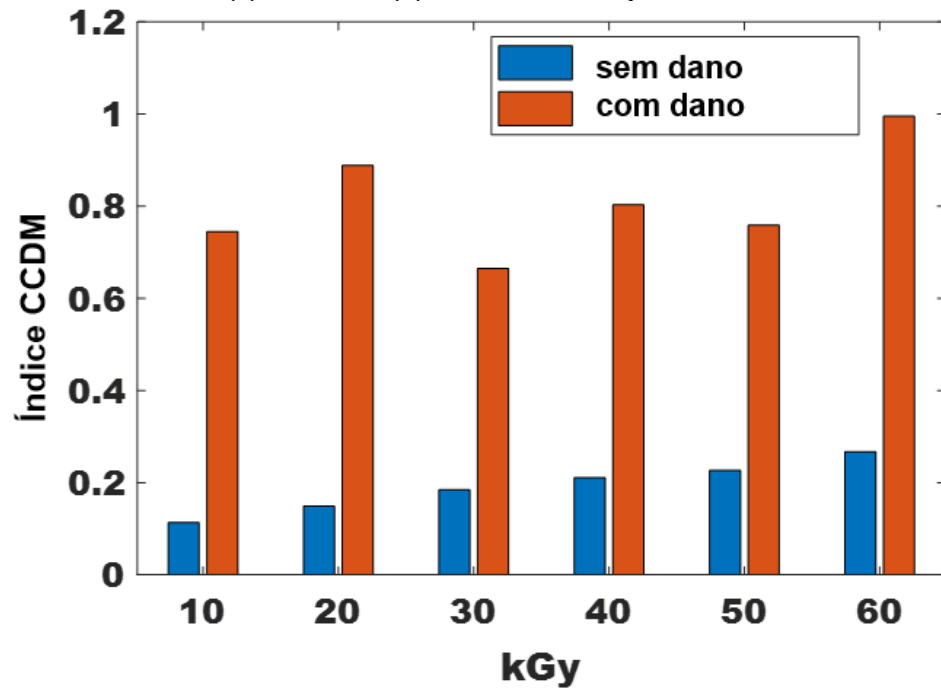


(a)

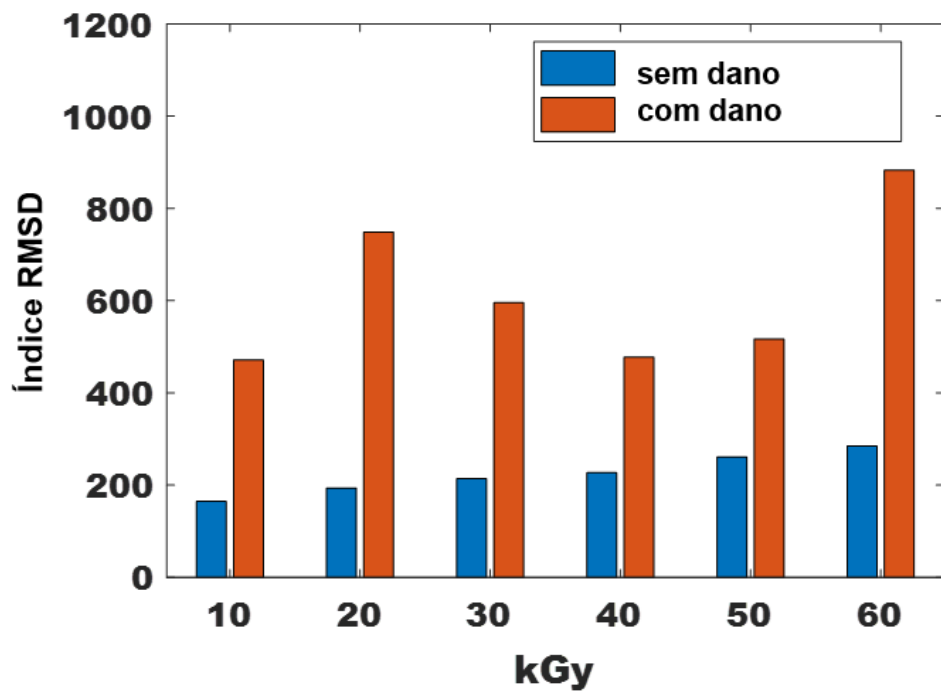


(b)

Figura 14: Índices CCDM (a) e RMSD (b) na faixa de frequência de 20 kHz à 30 kHz.

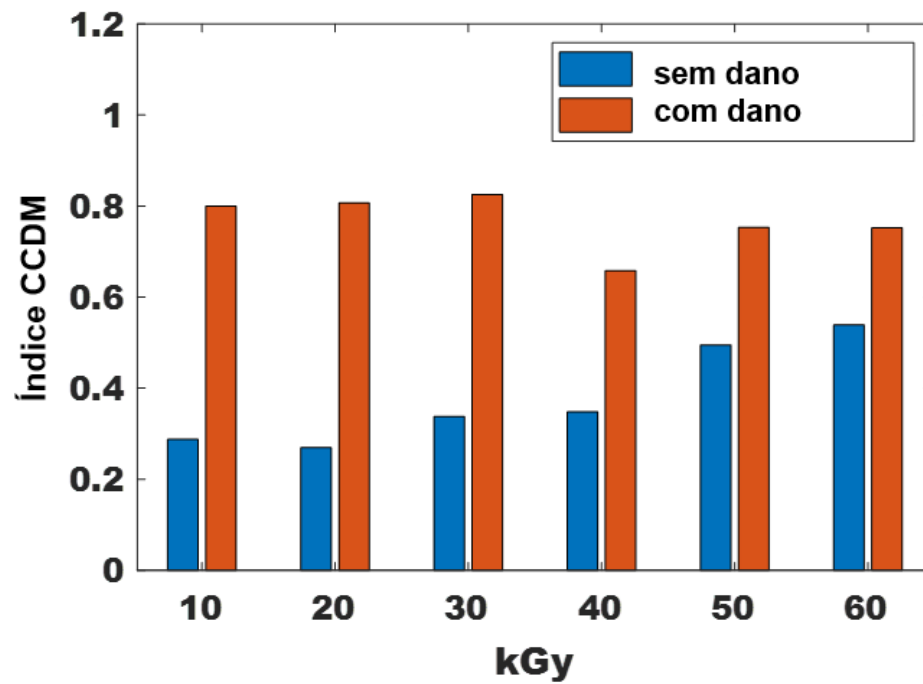


(a)

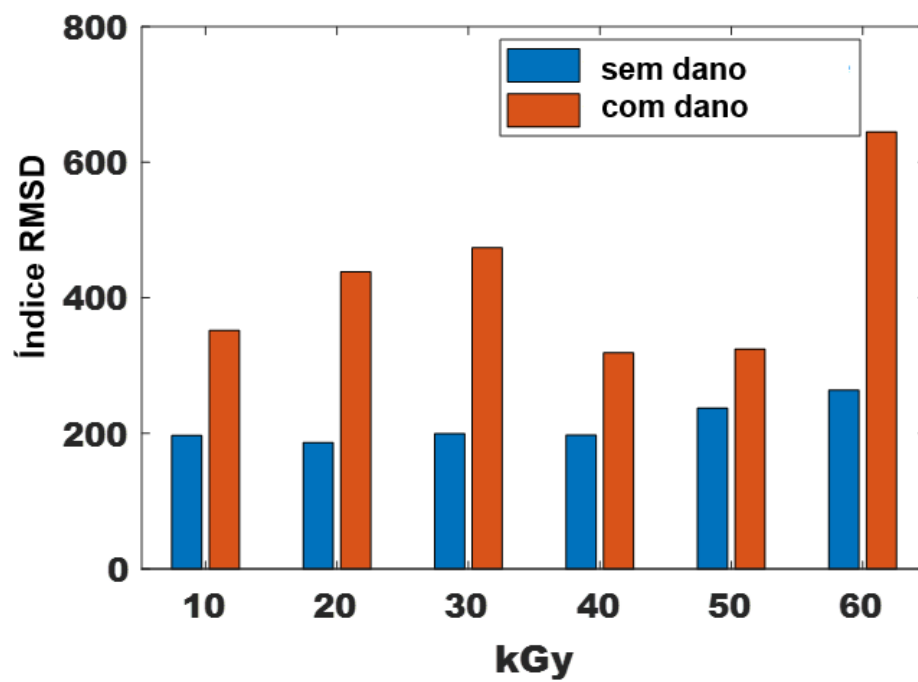


(b)

Figura 15: Índices CCDM (a) e RMSD (b) na faixa de frequência de 30 kHz à 40 kHz.

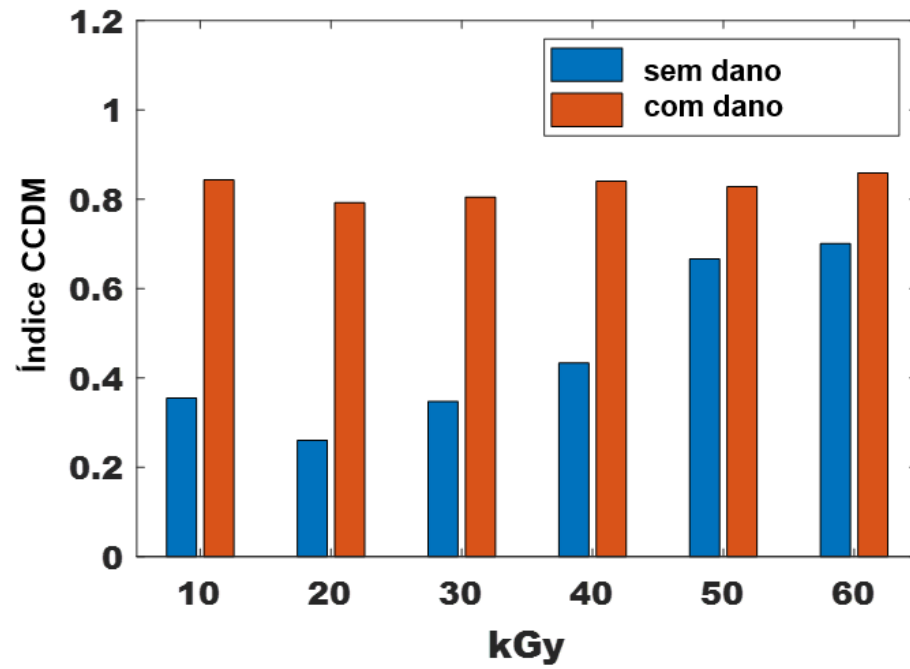


(a)

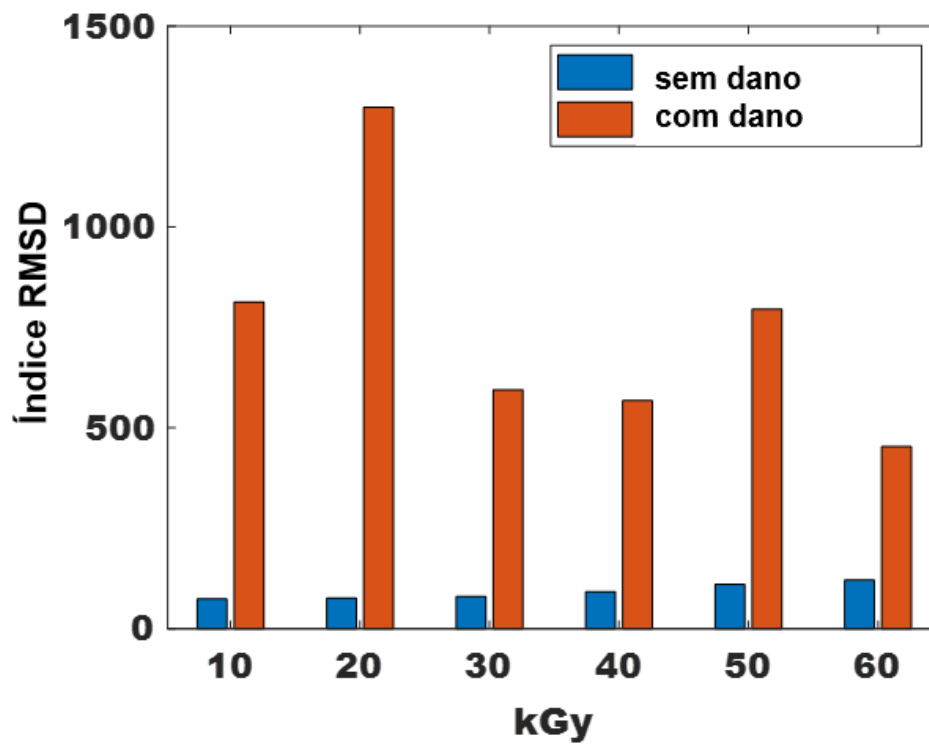


(b)

Figura 16: Índices CCDM (a) e RMSD (b) na faixa de frequência de 40 kHz à 50 kHz.

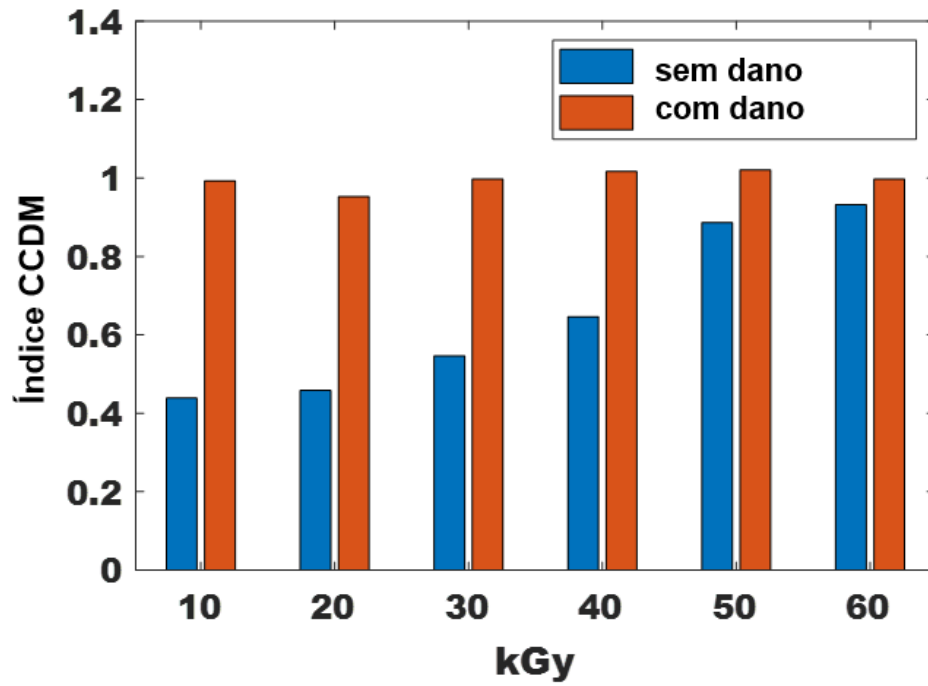


(a)

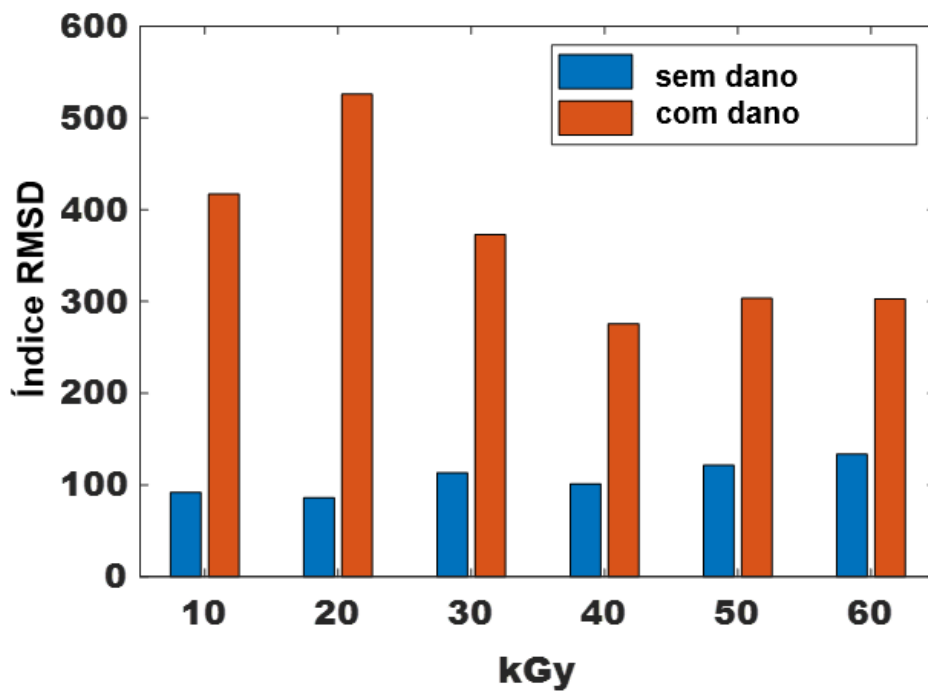


(b)

Figura 17: Índices CCDM (a) e RMSD (b) na faixa de frequência de 50 kHz à 65 kHz.

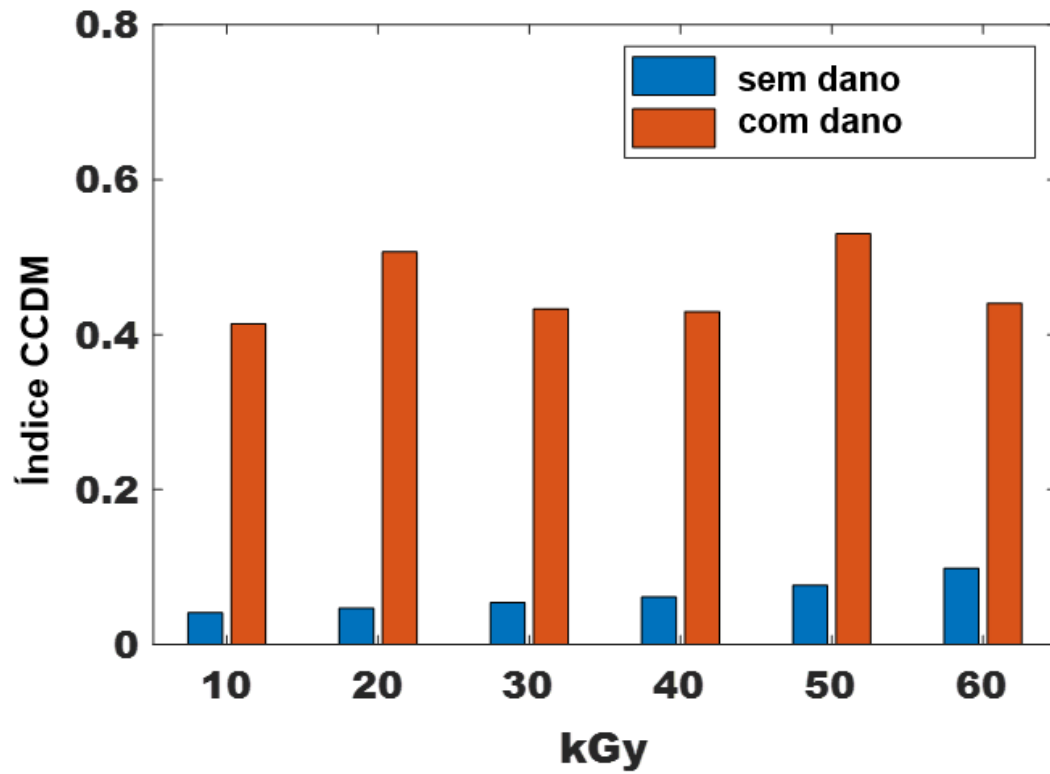


(a)

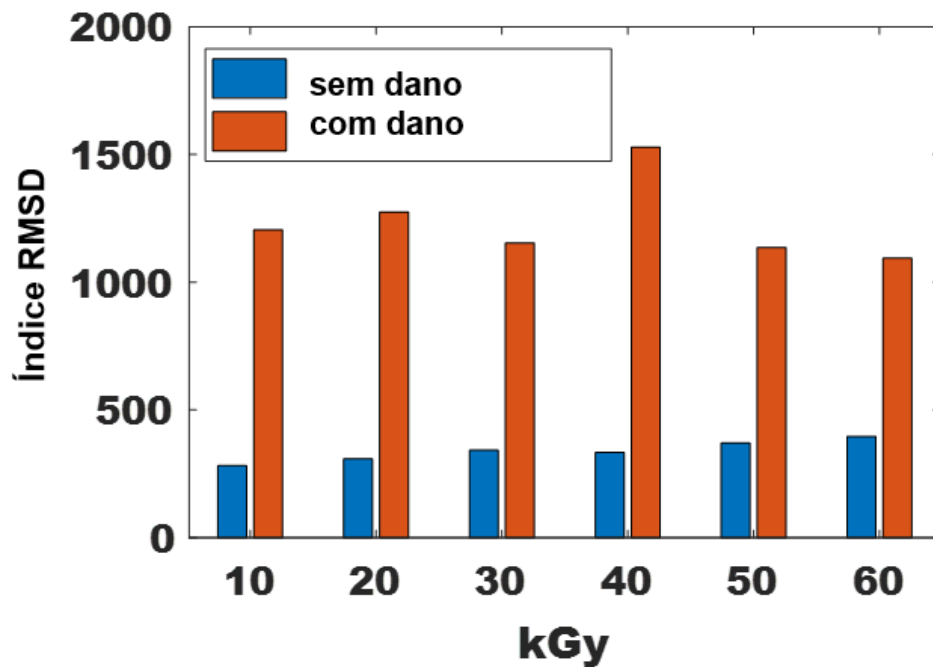


(b)

Figura 18: Índices CCDM (a) e RMSD (b) na faixa de frequência de 0 à 65 kHz.



(a)



(b)

Em relação a todos os casos, apesar da dose de radiação, o CCDM e o RMSD foram eficazes para realizar a detecção de danos, uma vez que os valores do índice foram maiores do que nos casos não danificados. Considerado os valores de CCDM e RMSD da condição não

danificada produzida pela pior condição (60 kGy), ele pode ser observado na Figura 12 (faixa de frequência de 2 a 10 kHz) que o CCDM aumentou, em média, 6,5 vezes com os danos. Em relação ao RMSD, esse valor foi 3 vezes maior em relação aos índices produzidos por uma inspeção não danificada sob o maior efeito de radiação. Nesse caso, o RMSD foi menos sensível aos danos em relação ao CCDM. Ao alcançar a mesma análise, esses valores foram, respectivamente, 337,5 % e 189 % para CCDM e RMSD, considerando a faixa de 10 kHz a 20 kHz (Figura 13). Para a faixa de frequência de 20 kHz a 30 kHz, o CCDM aumentou 536 % em relação a 78 % para o RMSD (Figura 14) e, para varia de 30 kHz a 40 kHz, esses valores foram de 50 % e 54 % (Figura 15).

Em relação aos resultados apresentados na banda de frequência de 40 kHz a 50 kHz (Figura 16), o CCDM aumentou 53 % com danos contra 300 % para o RMSD. Em relação à faixa de 50 kHz - 65 kHz (Figura 17), esses valores foram de 42 % e 191 % para o CCDM e RMSD, respectivamente. Para a banda de impedância completa apresentada na Figura 18, o CCDM aumentou 300 % e o RMSD em 150 %.

4.3. Discussão

Pode-se concluir que a radiação pode alterar os picos ressonantes dos sinais de impedância, conforme observado na Figura 4. As variações de impedância causadas pelo efeito da radiação no material piezelétrico e na estrutura, alteram as curvas de impedância e, no caso de uma estrutura não danificada, pode produzir um diagnóstico falso de danos, uma vez que a técnica EMI depende da mudança da curva de impedância para detectar danos. Para todos os casos apresentados nas Figuras 5-11, os índices relataram esse comportamento, pois crescem com a dose de radiação aplicada no componente monitorado.

No entanto, o índice CCDM é mais sensível às variações de impedância devido ao efeito da radiação, uma vez que a taxa de crescimento foi maior que a apresentada pelo índice RMSD. Ao considerar a aplicação da técnica EMI sob esse tipo de ambiente, como exploração de petróleo e gás, usinas nucleares, o índice RMSD pode ser uma alternativa promissora para realizar a detecção de danos, uma vez que o índice é menos sensível à radiação.

Também é importante observar que, de acordo com a Figura 4, a mudança no conteúdo de frequência é influenciada pela dose de radiação. Por exemplo, o efeito da radiação alterou as curvas de impedância de 2000 Hz a 4000 Hz e impõe maior variação de amplitude em relação à banda 8000 Hz a 10000 Hz. Com base nos resultados apresentados anteriormente, pode -se

notar que o valor RMSD para a banda de frequência de 30 kHz a 40 kHz, para inspeção de impedância sem danos, era menos sensível à radiação em relação às outras bandas.

Em relação à análise de danos, pode-se verificar que os valores do índice foram maiores do que para a condição de danos, indício que a técnica EMI pode funcionar sob efeito de radiação. No entanto, pode-se notar que é necessário definir limites dos valores das condições não danificadas para executar a detecção de falhas. Considerando o índice RMSD, que apresentava menor sensibilidade à radiação, a maior diferença para a condição não danificada e danificada foi realizada pela impedância extraída entre 40 kHz e 50 kHz ou todo o espectro. Nos dois casos, os índices aumentaram 300 %.

Conclusão

Este trabalho apresentou os efeitos da radiação na detecção de danos estruturais com base no método de impedância eletromecânica. Essa análise é importante, pois, em aplicações reais, como usinas nucleares e estruturas aeroespaciais, a radiação está presente e pode prejudicar as assinaturas de impedância como mostra este artigo. Nesse contexto, o CCDM e o RMSD foram extraídos para avaliar o comportamento dos índices tradicionais de danos relativos à detecção de danos.

Com base nos resultados, nas condições do presente experimento, o RMSD foi menos sensível à radiação e detecção de danos, pois apresentou valores mais baixos, em oposição ao índice CCDM que aumentou em taxas mais altas em relação ao RMSD. Além disso, as frequências entre 30 kHz e 50 kHz foram menos sensíveis a danos para ambos os índices. Para trabalhos futuros, outros níveis de radiação podem ser estudados. Além disso, análises adicionais podem discutir como a técnica EMI funciona quando o tamanho dos danos aumenta sob efeitos de radiação ou outros tipos de ruído pode prejudicar as medições de impedância.

Referências

- ALAZZAWI, O.; WANG, D. Damage identification using PZT impedance signal e residual algorithmic. **Journal of Civil Structural Health Monitoring**, v. 11, n. 1, p. 1225-1238, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13349-021-00505-9>.
- AL-BADOUR, A. N.; AL-GHAMDI, A. H.; Electromechanical Impedance Based Structural Health Monitoring: A Review. **Journal of Intelligent Material Systems and Structures**, v. 24, n. 17-18, p. 2317-2332, 2013.
- ALBAKRI, M. I.; TARAZAGA, P. A. Electromechanical impedance-based damage characterization using spectral element method. **Journal of Intelligent Material Systems e Structures**, v. 28, n. 1, p. 63–77, 2017. DOI: <http://dx.doi.org/10.1177/1045389X16642534>.
- BAPTISTA, F. G.; FILHO, J. V.; A New Impedance Measurement System for PZT-Based Structural Health Monitoring. **IEEE Transactions on Instrumentation e Measurement**, v. 58, n. 10, p. 3602–3608, 2009. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/TIM.2009.2018693>.
- BARRANCOS, A.; SILVESTRE, A.; ROSADO, L. S. **Desinging a eddy current testing structural health monitoring system**. In: Proc. IEEE Telecoms Conference, Leira, Pt., 2021. DOI: <https://doi.org/10.1109/ConfTELE50222.2021.9435460>.
- CAMPOS, F. S.; CASTRO, B. A.; BUDOYA, D. E.; BAPTISTA, F. G.; ULSON, J. A. C.; EREOLI, A. L. New Feature Extraction Approach Insensitive to Temperature Variations for Impedance-Based Structural Health Monitoring. **IET Science, Measurement & Technology**, v. 13, n. 4, p. 536-543, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1049/iet-smt.2018.5226>.
- CASTRO, B. A.; BAPTISTA, F. G.; CIAMPA, F. New imaging algorithm for material damage localisation based on impedance measurements under noise influence. **Measurement**, v. 163, n. 1, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2020.107953>.
- CASTRO, B. A.; BAPTISTA, F.; CIAMPA, F. New signal processing approach for structural healthy monitoring in noisy environments based on impedance measurements. **Measurement Elsevier Journal**, v. 137, n. 1, p. 155 – 167, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2019.01.054>.
- CHOWDARY, D. Y.; ALAPATI, M. Effect of external vibrations on electro-mechanical impedance signatures in damage detection. **Materialstoday: Proceedings**, v. 45, n. 1, p. 3398-3403, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.12.794>.
- FARRAR, C. R.; WORDEN, K. **Structural health monitoring: a machine learning perspective**. 1ª ed., John Wiley & Sons, Chichester, 2013. DOI: <http://dx.doi.org/10.1002/9781118443118>.
- FREITAS, E. S.; BAPTISTA, F. G. Experimental analysis of the feasibility of low-cost piezoelectric diaphragms in impedance-based SHM applications. **Sensors e Actuators A: Physical**, v. 238, n. 1, p. 220–228, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.sna.2015.11.031>.

GIURGIUTIU, V.; POSTOLACHE, C.; TUDOSE, M. Radiation, temperature, e vacuum effects on piezoelectric wafer active sensors. **Smart Material e Structures Journal**, v. 25, n. 3, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1088/0964-1726/25/3/035024>.

GORGIN, R.; LUO, Y.; WU, Z. Enviromental e operation conditions effects on Lamb waves based structural health monitoring systems: a review. **Ultrasonics**, v. 105, n. 1, p. 1-15, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ultras.2020.106114>.

HAIDER, F. M.; MEI, H.; LIN, B.; YU, L.; GIURGIUTIU, V.; LAMP, P. S.; VERST, C. **Piezoelectric wafer active sensors under gamma irradiation exposure toward applications for structural health monitoring of nuclear dry cast storage systems.** Conference Proceeding SPIE Smart Structures e Materials + Nondestructive Evaluation e Health Monitoring, v. 10559, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1117/12.2297390>.

HAYDARLAR, G.; TEKKALMAZ, M.; SOFUOĞLU, M. **Structural health monitoring method for in situ inspection of leing gears.** In: KUŞHAN, M.; GÜRGEN, S.; SOFUOĞLU, M. (eds) *Materials, Structures e Manufacturing for Aircraft. Sustainable Aviation*. Springer, Cham., 2022.

HOLBERT, K. E.; SANKARANARAYANAN, S.; MCCREADY, S. S. Response of lead metaniobate acoustic emission sensors to gamma irradiation. **IEEE Transactions on Nuclear Science**, v. 52, n. 6, p. 2583-2590, 2005. DOI: <https://doi.org/10.1109/TNS.2005.860708>.

JIANG, X.; ZHANG, X.; YUXIANG, Z. Evaluation of characterization indexes e minor looseness identification of flange bolt under noise influence. **IEEE access**, v. 8, n. 1, p. 157691-157702, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3019416>.

KRALOVEC, C.; SCHARGERL, M. Review of structural health monitoring methods regarding a multi-sensor approach for damage assessment of metal a composite structures. **Sensors (Basel)**, v. 20, n. 3, p. 826, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/s20030826>.

LI, X.; QU, W.; XIAO, L.; LU, Y. Removal of temperature effect in impedance-based damage detection using the cointegration method. **Journal of Material Systems e Structures**, v. 30, n. 15, p. 2189-2197, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1177/1045389X19862364>.

LIN, B.; MENDEZ-TORRES, A. E.; GRESIL, M.; GIURGIUTIU, V. **Structural health monitoring with piezoelectric wafer active sensors exposed to irradiation effects.** Pressure Vessels e Piping Conference, p. 155-161, 2013.

MEITZLIER, A. H. et al. **IEEE steard on piezoelectricity: An American national steard.** New York: IEEE-ANSI, 66 p., Std., 176, 1988. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/IEEESTD.1988.79638>

MOLL, J.; SCHMIDT, M.; KASGEN, J.; MEHLDAU, J.; BUCKER, M.; HAUPT, F. Detection of pin failure in carbon fiber composites using the electro-mechanical impedance method. **Sensors (Basel)**, v. 20, n. 13, p. 3732, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/s20133732>.

MULLER, A.; ROBERTSON-WELSH, B.; GAYDECKI, P.; GRESIL, M.; SUOTIS, C. Structural health monitoring using lamb wave reflections e total focusing method for image reconstruction. **Applied Composite Material**, v. 24, n. 1, p. 553-573, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10443-016-9549-5>.

NETO, R. M. F.; GALLO, C. A.; JUNIOR, V. S. Convolutional neural network e impedance-based SHM applied to damage detection. **Engineering Research Express**, v. 2, n. 3, p. 1-14, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1088/2631-8695/abb568>.

OSTACHOWICS, W.; SOMAN, R.; MANIŁOWSKI, P. Optimization of sensor placement for structural health monitoring: a review. **Structural Healht Monitoring Journal**, v. 18, n. 3, p. 963-988, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1177%2F1475921719825601>.

RANDALL, R. B.; INMAN, D. J.; WORDEN, K. Challenges and Opportunities in Structural Health Monitoring. **Journal of Sound and Vibration**, v. 330, n. 1-2, p. 1-22, 2012.

UNSCEAR. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. **Sources, effects e risks of ionizing radiation**. United Nations, 2017.

URSU, I.; TUDOSE, M.; ENCIU D. Qualification of PWAS-Based SHM technology for space applications. **Structural Health Monitoring from Sensing to Processing**, v. 117, n. 1, p. 2018. DOI: <https://doi.org/10.5772/interchopen.78034>.

VISALAKSHI, T.; BHALLA, S.; GRUPTA, A. Monitoring early hydration of reinforced concrete structures using structural parameters identified by piezo sensors via electromechanical impedance technique. **Mechanical Systems e Signal Processing**, v. 99, p. 129-141, 2018. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ymssp.2017.05.042>.

WEOWSKI, T.; MALINOWSKI, P. H.; OSTACHOWICZ, W. M. Temperature e damage influence on electromechanical impedance method used for carbon fibre–reinforced polymer panels. **Journal of Intelligent Material Systems e Structures**, v. 28, n. 6, p. 782-798, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1177/1045389X1665742>.

WU, B.; WU, G.; YANG, C.; HE, Y. Damage identification method for continuous girder bridges based on spatially-distributed long-gauge strain sensing under moving load. **Mechanical System e Signal Processing**, v. 104, n. 1, p. 415–435, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2017.10.040>.

WU, T.; LIU, G.; FU, S.; XING, F. Recent progress of fiber-optic sensors for structural health monitoring of civil structure. **Sensors (Basel)**, v. 20, n. 16, p. 4517, 2020. DOI: <https://dx.doi.org/10.3390%2Fs20164517>.

XINGYU, F.; LI, J.; HAO, H. Impedance resonant frequency sensitivity based structural damage identification with sparse regularization: experimental studies. **Smart Materials e Structures**, v. 28, n. 1, p. 964-1726, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1088/1361-665X/aaeb7a>.

XU, H.; LI, Y.; WU, X. Applications of Electromechanical Impedance Based Structural Health Monitoring. **Journal of Sound and Vibration**, v. 330, n. 1-2, p. 44-65, 2012.

YANG, J. N.; LIU, S. C.; LEU, M. C.; LIN, Y. C. Structural Health Monitoring: A Review of the State-of-the-Art. **Journal of Sound and Vibration**, v. 330, n. 1-2, p. 23-43, 2012.