

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

**Faculdade de Engenharia
Campus de Ilha Solteira**

Lorena Lopes Dias

**Estratégias de Compensação de
Temperatura na técnica de
Impedância Eletromecânica**

Ilha Solteira - SP
Agosto de 2021

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

**Faculdade de Engenharia
Campus de Ilha Solteira**

Lorena Lopes Dias

Estratégias de Compensação de Temperatura na técnica de Impedância Eletromecânica

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira – UNESP como parte dos requisitos para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Douglas Domingues Bueno

Coorientadora: Prof. Dr. Camila Gianini Gonsalez-Bueno

Ilha Solteira - SP
Agosto de 2021

FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

- D541e Dias, Lorena Lopes.
Estratégias de compensação de temperatura na técnica de impedância eletromecânica / Lorena Lopes Dias. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2021
102 f. : il.
- Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Mecânica) -
Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, 2021
- Orientador: Douglas Domingues Bueno
Coorientadora: Camila Gianini Gonzalez-Bueno
Inclui bibliografia
1. Monitoramento da integridade estrutural. 2. Impedância eletromecânica.
3. Temperatura. 4. Técnicas de compensação de temperatura. 5. Dados
experimentais.


Raiane da Silva Santos

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA "JÚLIO DE MESQUITA FILHO"

FACULDADE DE ENGENHARIA - CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA

CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

ATA DA DEFESA – TRABALHO DE GRADUAÇÃO

TÍTULO: Estratégias de compensação de temperatura na técnica de Impedância Eletromecânica

ALUNA: Lorena Lopes Dias

RA: 161051545

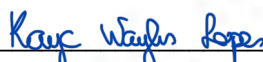
ORIENTADOR: Douglas Domingues Bueno

Aprovado (X) - Reprovado () pela Comissão Examinadora

Comissão Examinadora:

Prof. 
Presidente (Orientador)

Prof. 
Dr. Sanderson Manoel da Conceição
Faculdade de Engenharia, Univ. Federal da Grande Dourados

Eng. 
Kayc Wayhs Lopes
Doutorando, Eng. Mec. FEIS

Ilha Solteira (SP) 19 de agosto de 2021.

Agradecimentos

Gostaria de agradecer primeiramente a Deus.

Aos meus orientadores Douglas Domingues Bueno e Camila Gianini Gonzalez-Bueno pelas correções, ensinamentos, conselhos e ajuda aos longo desses anos, desde a iniciação científica.

À minha família e amigos que sempre estiveram ao meu lado me apoiando ao longo de toda a minha trajetória.

Também agradeço aos professores e funcionários da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, a Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira e Departamento de Engenharia Mecânica.

Resumo

Um dos grandes desafios da engenharia é evitar a ocorrência de falhas em estruturas durante o exercício de sua função. À vista disso, nas últimas décadas diversas pesquisas têm sido realizadas na área de Monitoramento da Integridade Estrutural (SHM, do inglês *Structural Health Monitoring*) com o objetivo de desenvolver e aprimorar técnicas de monitoramento. Entre essas, a técnica da Impedância Eletromecânica (IE) tem atraído atenção devido aos seus importantes e promissores resultados conhecidos na literatura, principalmente envolvendo o processamento de sinais. Entretanto, a sensibilidade dessa técnica às variações das condições ambientais (externas) pode conduzir a falsos diagnósticos, sendo a temperatura um dos fatores mais críticos para a técnica de Impedância Eletromecânica. Em vista disso, diversos pesquisadores desenvolveram técnicas de compensação a fim de minimizar os efeitos provocados pela variação da temperatura nas medições de impedância. Nesse contexto, o presente trabalho investiga a viabilidade de algumas estratégias de compensação de temperatura ao aplicá-las nos dados experimentais aferidos para uma viga de alumínio em três condições distintas: sem dano, com um dano caracterizado pelo acréscimo de massa e outro pela presença de um corte na estrutura. Os resultados obtidos indicam que três das quatro técnicas de compensação investigadas foram capazes de minimizar o efeito da temperatura no sistema estudado.

Palavras-chave: Monitoramento da Integridade Estrutural, Impedância Eletromecânica, Temperatura, Técnicas de Compensação de Temperatura, Dados Experimentais.

Abstract

An important challenge for engineers is to avoid structural failures in the operational environment, and because of this, several researchers have carried out studies in the field of structural health monitoring (SHM). Different strategies and techniques have been presented in the literature and particularly the Electromechanical Impedance (EMI) technique has attracted attention due to its results for several types of structures, mainly involving post-processing of experimental signals. However, EMI technique is sensitive to the environmental variations, such as the temperature, which can lead to false diagnoses. Due to its characteristic, there are different strategies to compensate for the temperature effect on the damage detection using the EMI. In this context, this work investigates four different techniques applied to compensate for the influence of temperature in the damage detection using the EMI. Experimental signals are considered to evaluate each of these approaches, and two types of damage are separately investigated. The first type is based on increasing the local mass, and the second type is represented by a short cut in the structure. The results obtained indicate that three of those four compensation techniques are able to minimize the effect of temperature in the studied system.

Keywords: Structural Health Monitoring, Electromechanical Impedance, Temperature, Temperature Compensation Techniques, Experimental Data.

Lista de Figuras

1	Principais etapas de um sistema SHM.	15
2	Representação dos efeitos piezoelétricos direto e inverso em um transdutor piezoelétrico cilíndrico.	16
3	Magnitude e fase da Impedância Eletromecânica considerando variações nas propriedades do PZT e da estrutura devido às alterações da temperatura.	19
4	Aproximação no quinto pico e vale da Impedância Eletromecânica apresentada na Figura 3: (a) pico e (b) vale.	19
5	Representação da Impedância Eletromecânica de um modelo simplificado de 1 g.d.l. acoplado a um PZT de barra.	24
6	Parte real da impedância eletromecânica em diferentes iterações da técnica de Park et al. (1999) para o sinal de referência (preto) e desconhecido (azul).	26
7	Parte real da impedância elétrica de uma viga de aço carbono com variação da temperatura: (a) não compensada e (b) compensada. . . .	27
8	Curvas de impedância eletromecânica em diferentes iterações da técnica de Koo et al. (2009) para o sinal de referência (preto) e desconhecido (azul).	29
9	Parte real da impedância de duas medições na condição sem dano de uma armação de aço com apenas variação de temperatura: (a) não compensada e (b) compensada.	30
10	Parte real da assinatura de impedância de uma viga de alumínio a 72 °C e 25 °C: (a) não compensada e (b) compensada.	31
11	Curva da susceptância de um sensor na condição sem dano a 45 °C. . .	34
12	Os valores de inclinação dos: (a) três sensores sem danos (PZT A, B e C) e dos dois danificados (PZT AA e CC) e (b) os limites indicando o intervalo associado a um sensor sem defeito.	34
13	Viga com PZT acoplado em sua superfície.	36
14	Esquema representativo da montagem experimental empregada. . . .	37
15	Viga suspensa por elásticos simulando a condição livre-livre.	37
16	Imagens contendo os danos simulados.	38
17	Parte real da impedância eletromecânica referente ao sinal sem dano. .	40
18	Parte real da impedância eletromecânica referente ao sinal com falha 1. .	40
19	Parte real da impedância eletromecânica referente ao sinal com falha 2. .	41
20	Parte real da impedância eletromecânica referente ao sinal sem dano após a implementação da técnica de compensação de Park et al. (1999).	42

21	Parte real da impedância eletromecânica referente ao sinal com falha 1 após a implementação da técnica de compensação de Park et al. (1999).	43
22	Parte real da impedância eletromecânica referente ao sinal com falha 2 após a implementação da técnica de compensação de Park et al. (1999).	43
23	Parte real da impedância eletromecânica normalizada referente ao sinal sem dano após a implementação da técnica de compensação de Koo et al. (2009).	44
24	Parte real da impedância eletromecânica normalizada referente ao sinal com falha 1 após a implementação da técnica de compensação de Koo et al. (2009).	45
25	Parte real da impedância eletromecânica normalizada referente ao sinal com falha 2 após a implementação da técnica de compensação de Koo et al. (2009).	45
26	Parte real da impedância eletromecânica referente ao sinal sem dano após a implementação da técnica de compensação de Baptista et al. (2014).	47
27	Parte real da impedância eletromecânica referente ao sinal com falha 1 após a implementação da técnica de compensação de Baptista et al. (2014).	47
28	Parte real da impedância eletromecânica referente ao sinal com falha 2 após a implementação da técnica de compensação de Baptista et al. (2014).	48
29	Desvio médio quadrático (RMSD) para os sinais na condição sem dano considerando as 3 técnicas de compensação: Park et al. (1999), Koo et al. (2009) e Baptista et al. (2014).	50
30	Métrica do desvio do coeficiente de correlação (CCDM) para os sinais na condição sem dano considerando as 3 técnicas de compensação: Park et al. (1999), Koo et al. (2009) e Baptista et al. (2014).	51
31	Desvio médio quadrático (RMSD) para a condição com falha 1 considerando as 3 técnicas de compensação: Park et al. (1999), Koo et al. (2009) e Baptista et al. (2014).	51
32	Métrica do desvio do coeficiente de correlação (CCDM) para a condição com falha 1 considerando as 3 técnicas de compensação: Park et al. (1999), Koo et al. (2009) e Baptista et al. (2014).	52
33	Desvio médio quadrático (RMSD) para a condição com falha 2 considerando as 3 técnicas de compensação: Park et al. (1999), Koo et al. (2009) e Baptista et al. (2014).	52

34	Métrica do desvio do coeficiente de correlação (CCDM) para a condição com falha 2 considerando as 3 técnicas de compensação: Park et al. (1999), Koo et al. (2009) e Baptista et al. (2014).	53
35	Valores de RMSD para os sinais compensados pela técnica de Park et al. (1999).	54
36	Valores de CCDM para os sinais compensados pela técnica de Park et al. (1999).	54
37	Valores de RMSD para os sinais compensados pela técnica de Koo et al. (2009).	55
38	Valores de CCDM para os sinais compensados pela técnica de Koo et al. (2009).	56
39	Valores de RMSD para os sinais compensados pela técnica de Baptista et al. (2014).	57
40	Valores de CCDM para os sinais compensados pela técnica de Baptista et al. (2014).	57
41	Curvas da susceptância em função da temperatura para o sinal na condição sem dano.	58
42	Curvas da susceptância em função da temperatura para o sinal com falha tipo 1.	58
43	Curvas da susceptância em função da temperatura para o sinal com falha tipo 2.	59
44	Inclinação das curvas de susceptância apresentadas nas Figuras 41 a 43.	59
45	Representação da média e dos limites superior e inferior do sinal sem dano considerando $n = 1$	61
46	Representação da média e dos limites superior e inferior do sinal sem dano considerando $n = 2$	61
47	Representação da média e dos limites superior e inferior do sinal sem dano considerando $n = 3$	62

Lista de Símbolos

Y_{EM}	Admitância
V	Diferença de potencial
I	Corrente elétrica
ω	Frequência angular
m_{eq}	Massa equivalente
k_{eq}	Rigidez equivalente
c_{eq}	Amortecimento
l_A	Comprimento do PZT
w_A	Largura do PZT
h_A	Espessura do PZT
$\bar{\epsilon}_{33}^T$	Constante dielétrica do PZT sob uma tensão constante
d_{31}	Constante piezoelétrica
$\bar{Y}_{11}^E$	Módulo de elasticidade complexo do PZT sob um campo elétrico constante
j	Número imaginário puro (0,1)
Z	Impedância mecânica da estrutura
Z_A	Impedância mecânica do PZT
V_a	Soma do quadrado da variação da parte real da impedância
Z_R	Impedância de referência
Z_D	Impedância desconhecida
δ^S	Média da diferença entre a impedância de referência e a impedância medida
C_C	Coeficiente de correlação cruzada
$\bar{Z}_R$	Valor média da impedância de referência
$\bar{Z}_D$	Valor média da impedância desconhecida
σ_{Z_R}	Desvio padrão da impedância de referência
σ_{Z_D}	Desvio padrão da impedância desconhecida
$\tilde{\omega}$	Frequência deslocada durante o processo de compensação
$\hat{Z}_D$	Impedância compensada em ambos os eixos
N	Número de pontos de frequência
d_f	Passo de frequência
Δf	Deslocamento de frequência
B	Susceptância
m	Inclinação da susceptância
b	Valor que intercepta o eixo y da susceptância
T	Temperatura em °C
μ_m	Média dos valores de inclinação de susceptância
μ_b	Média dos valores que interceptam o eixo y da susceptância
σ_m	Desvio padrão dos valores de inclinação da susceptância

σ_b	Desvio padrão das intercepções no eixo y da susceptância
n	Número de desvios usados

Sumário

1	Introdução	14
1.1	Monitoramento da integridade estrutural	14
1.2	Transdutores piezoelétricos	15
1.3	Técnica da impedância eletromecânica	16
1.4	Efeito da temperatura nas curvas de Impedância	18
1.5	Objetivos	21
1.6	Organização do Trabalho	21
2	Metodologia	23
2.1	Impedância Eletromecânica	23
2.2	Técnicas de Compensação	24
2.2.1	Técnica desenvolvida por Park et al. (1999)	24
2.2.2	Técnica desenvolvida por Koo et al. (2009)	27
2.2.3	Técnica desenvolvida por Baptista et al. (2014)	30
2.2.4	Técnica desenvolvida por Grisso & Inman (2010)	32
2.3	Índices Métricos	35
2.3.1	RMSD	35
2.3.2	CCDM	35
3	Dados experimentais	36
3.1	Setup Experimental	36
3.2	Seleção dos Dados	39
4	Resultados e Discussões	42
4.1	Análise da técnica de Park et al. (1999)	42
4.2	Análise da técnica de Koo et al. (2009)	44
4.3	Análise da técnica de Baptista et al. (2014)	46
4.4	Comparação das técnicas do Park et al. (1999), Koo et al. (2009) e Baptista et al. (2014)	48
4.5	Tendência dos índices métricos após a compensação dos sinais de impedância eletromecânica	53
4.5.1	Técnica de Park et al. (1999)	53
4.5.2	Técnica de Koo et al. (2009)	54
4.5.3	Técnica de Baptista et al. (2014)	56
4.6	Análise da técnica de Grisso & Inman (2010)	58
5	Considerações Finais	63
5.1	Conclusões	63

5.2	Trabalhos Futuros	63
6	Referências	65
A	Códigos do Pyhton	70
A.1	Técnica de Park et al. (1999)	70
A.2	Técnica de Koo et al. (2009)	78
A.3	Técnica de Baptista et al. (2014)	87
A.4	Técnica de Grisso & Inman (2010)	94

1 Introdução

Este capítulo apresenta uma breve revisão dos principais tópicos abordados neste trabalho de graduação.

1.1 Monitoramento da integridade estrutural

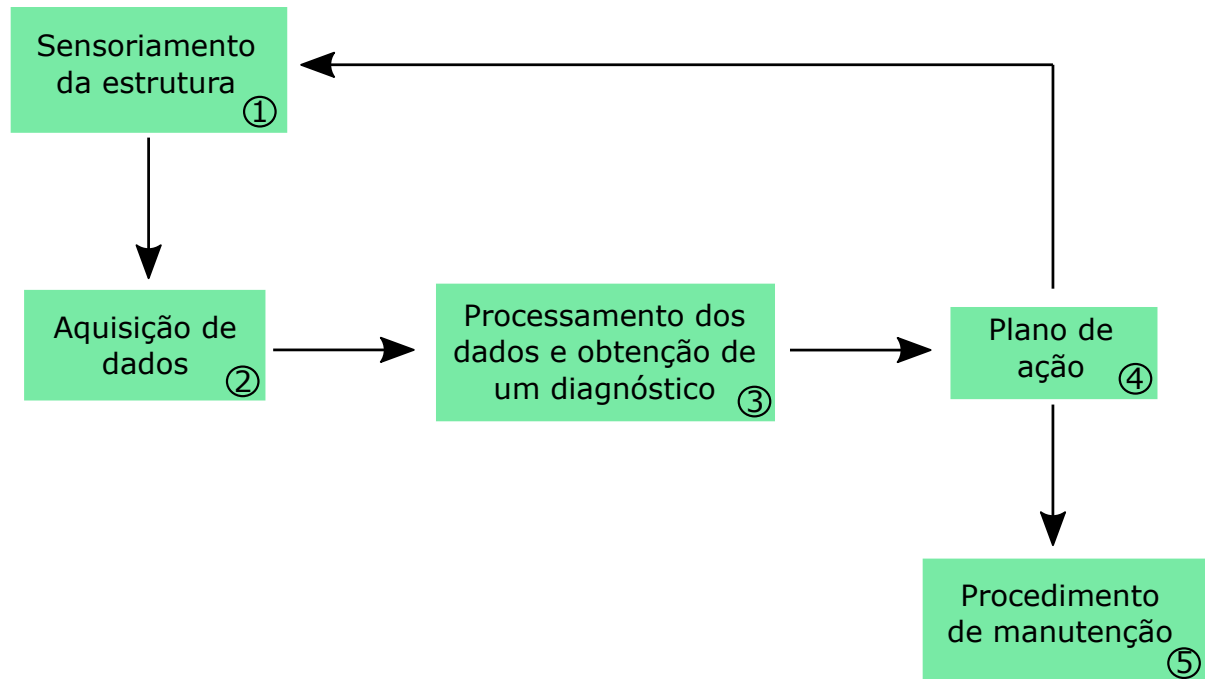
O conhecimento sobre integridade das estruturas em serviço atuando em tempo real é uma das principais metas dos engenheiros, o qual também iria favorecer os usuários finais, as equipes de manutenção e os fabricantes em geral. Mediante este conhecimento, os usuários dos produtos podem usufruir destes com mais confiança e segurança no uso ideal dos mesmos; além disso, pode-se minimizar o tempo de inatividade, a quantidade de inspeções periódicas, assim como evitar que ocorram falhas acidentais e catastróficas (Chang 1999). Em vista disso, inúmeras pesquisas têm sido realizadas nas últimas décadas sobre sistemas capazes de monitorar e detectar danos ainda em estágios iniciais, os quais são conhecidos como Monitoramento da Integridade Estrutural (SHM, do inglês *Structural Health Monitoring*).

O Monitoramento da Integridade Estrutural busca comunicar, a cada momento da vida de uma estrutura, o diagnóstico referente ao seu estado, o qual deve permanecer no domínio especificado no projeto, embora isso possa ser alterado devido ao envelhecimento associado ao seu uso, pela ação do ambiente e por eventos acidentais (Balageas et al. 2006). Segundo Farrar et al. (2005), este método consiste na observação do sistema estrutural ao longo do tempo por meio da medição das respostas dinâmicas amostradas periodicamente por um conjunto de sensores, das quais extraem-se recursos sensíveis aos danos e, por fim, realiza-se a análise estatística destes para determinar o estado atual do sistema. A longo prazo, é possível obter um diagnóstico atualizado periodicamente referente a capacidade da estrutura em desempenhar sua função em vista do inevitável envelhecimento e degradação resultante dos ambientes de operação (Farrar et al. 2005). Em síntese, a essência da tecnologia SHM é desenvolver sistemas autônomos para o monitoramento contínuo, inspeção e detecção de danos de estruturas com o mínimo envolvimento humano (Chang 1999).

Na Figura 1, tem-se a representação das etapas envolvidas no SHM. A primeira consiste no acoplamento de sensores ao longo da estrutura, a partir dos quais obtêm-se os dados necessários para a análise da mesma (etapa 2). A terceira etapa interpreta os sinais obtidos por meio da utilização de algum programa computacional, os quais determinam o diagnóstico da estrutura, a partir do qual define-se o plano de ação (etapa 4), i.e, se existe a necessidade de interceptação para impedir a propagação de alguma eventual falha (etapa 5) ou se não é necessário nenhuma intervenção,

reiniciando o ciclo (Louzada 2019).

Figura 1: Principais etapas de um sistema SHM.



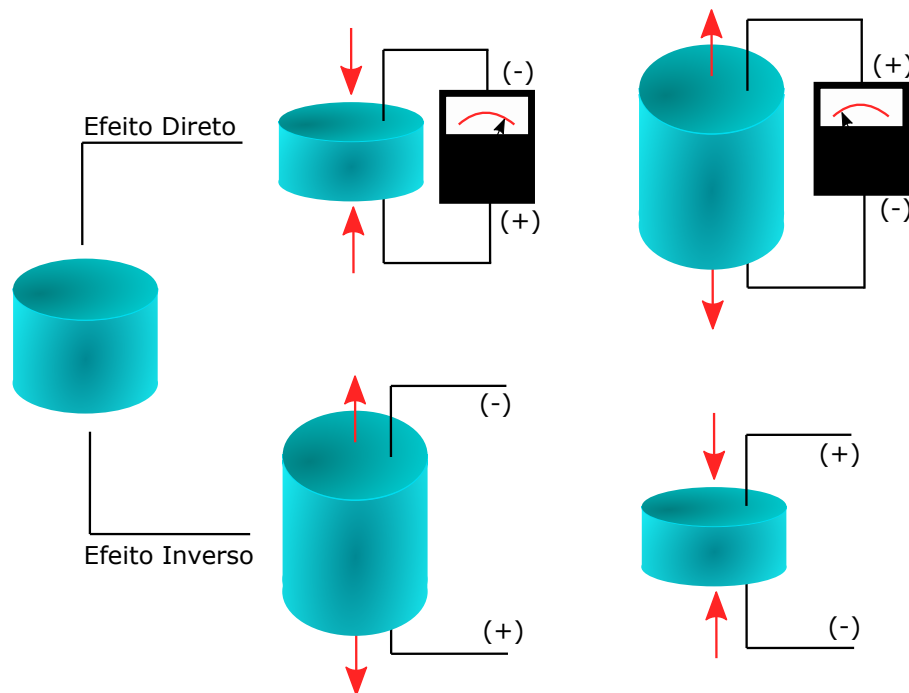
Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

1.2 Transdutores piezoelétricos

Um transdutor é qualquer dispositivo usado para converter energia de uma natureza para outra, sendo que no caso dos transdutores piezoelétricos trabalha-se com a energia elétrica e mecânica. Por esse motivo, esses materiais são amplamente empregados para atuarem como atuadores e sensores, sendo que os primeiros são caracterizados por transformarem o sinal elétrico em uma grandeza física (movimento, calor, deformação, etc.); enquanto que a função do sensor é oposta, ou seja, o mesmo converte as grandezas físicas aferidas em um sinal elétrico, o qual é interpretado por certos equipamentos eletrônicos, obtendo, assim, informações sobre o meio físico em que estão presentes. Portanto, ambos os equipamentos incluem transdutores em sua composição, visto que os mesmos são responsáveis por converterem uma forma de energia em outra.

Os materiais piezoelétricos são caracterizados por apresentarem a capacidade de desenvolverem cargas elétricas quando sujeitos a esforços mecânicos (efeito direto), agindo como um sensor e, inversamente, também sofrem deformações mecânicas sob a ação de algum campo elétrico (efeito inverso), sendo esta propriedade relacionado à função de um atuador (Tebaldi 2014), como pode ser observado na Figura 2.

Figura 2: Representação dos efeitos piezoelétricos direto e inverso em um transdutor piezoelétrico cilíndrico.



Fonte: Adaptado de Gonsalez (2012).

1.3 Técnica da impedância eletromecânica

A técnica da impedância eletromecânica (IE) (ou EMI, do inglês *Eletromechanical Impedance*) é caracterizada pela utilização de materiais inteligentes conhecidos como transdutores piezoelétricos, em especial as cerâmicas piezoelétricas ou PZT (do inglês *Leads Zirconate Titanate*). Foi sugerida primeiramente por Liang et al. (1993) como um possível método para aplicação do princípio do Monitoramento da Integridade Estrutural em todos os tipos de estruturas e sistemas de engenharia (Bhalla & Soh 2004). Desde então, diversas pesquisas exibiram promissores resultados referentes a sua utilização, principalmente envolvendo o processamento de sinais em tempo real para a detecção de danos incipientes.

Esta técnica baseia-se no efeito piezoelétrico, o qual é responsável pelo acoplamento eletromecânico entre a estrutura e o PZT nela instalado, sendo que este instrumento irá agir como atuador e sensor, os quais, respectivamente, excitam a estrutura monitorada e medem a resposta da mesma. Sua metodologia consiste, basicamente, em acoplar o transdutor piezoelétrico à estrutura e, então, verifica-se a presença de um eventual dano por meio do monitoramento das curvas da impedância elétrica do material piezoelétrico, a qual está associada a impedância mecânica da estrutura, sendo esta influenciada pela presença do dano. Usualmente, compara-se o sinal adquirido

em um estado desconhecido da estrutura com o sinal obtido para a estrutura sem dano, *baseline*, e a partir desta comparação determina-se o diagnóstico da estrutura.

Existem diversas técnicas não-destrutivas que podem ser aplicadas ao monitoramento da integridade estrutural, como aquelas que utilizam ondas guiadas de ultrassom (Reusser et al. 2014), sensores de fibra óptica (García et al. 2015), ondas de Lamb (Padiyar & Balasubramaniam 2013) ou emissão acústica (Tziavos et al. 2020). Apesar disso, a técnica EMI é amplamente utilizada devido a sua relativa simplicidade e baixo custo dos materiais piezoelétricos. Esta alcançou maior destaque após trabalhos como os de Liang et al. (1993, 1996), Sun et al. (1995a), Zhou et al. (1996) Giurgiutiu et al. (1999), Park et al. (2000a), entre outros autores. Gyuhae Park & Inman (2003) apresentaram o primeiro trabalho consolidando uma revisão sobre a técnica, inferindo que a mesma apresenta várias vantagens em relação às outras abordagens não-destrutivas, como aquelas mencionadas anteriormente envolvendo o uso de ondas guiadas, fibra óptica, emissão acústica, entre outros exemplos. Annamdas & Soh (2010) analisam alguns dos avanços no campo do SHM baseado na utilização de PZT feitos nas últimas duas décadas em estruturas de engenharia. Este artigo também fornece uma visão sobre os possíveis futuros trabalhos e as melhorias necessárias para a técnica EMI baseada em PZT, como utilizar um material mais flexível (como o MFC, do inglês *Macro Fiber Composite*) para fabricar esses dispositivos ou a integração desta técnica com outros métodos, especialmente a tecnologia sem fio, para um SHM mais eficaz. O mesmo estudo envolvendo uma revisão bibliográfica foi aplicado por Na & Baek (2018), os quais também analisam práticas mais recentes como algoritmos de redes neurais artificiais (Giurgiutiu & Kropas-Hughes 2003) ou o método dos elementos finitos (Tseng & Wang 2004), concluindo que esta técnica tem um grande potencial a ser explorado.

Trabalhos científicos publicados mostram que a técnica IE pode ser implementada experimentalmente em vários tipos de estruturas, dentre elas, treliças (Sun et al. 1995a), estruturas civis como pontes de concreto (Ayres et al. 1998, Park et al. 2000, Peairs et al. 2004), estruturas aeronáuticas (Moura Junior & Steffen Junior 2006), aeroespaciais (Giurgiutiu & Zagari 2005), redes de tubulações (Park et al. 2001, Peairs et al. 2004), estruturas em materiais compósitos (Tsuruta 2008), ou em amostras de polímero reforçado com fibra de carbono (Fiborek et al. 2018).

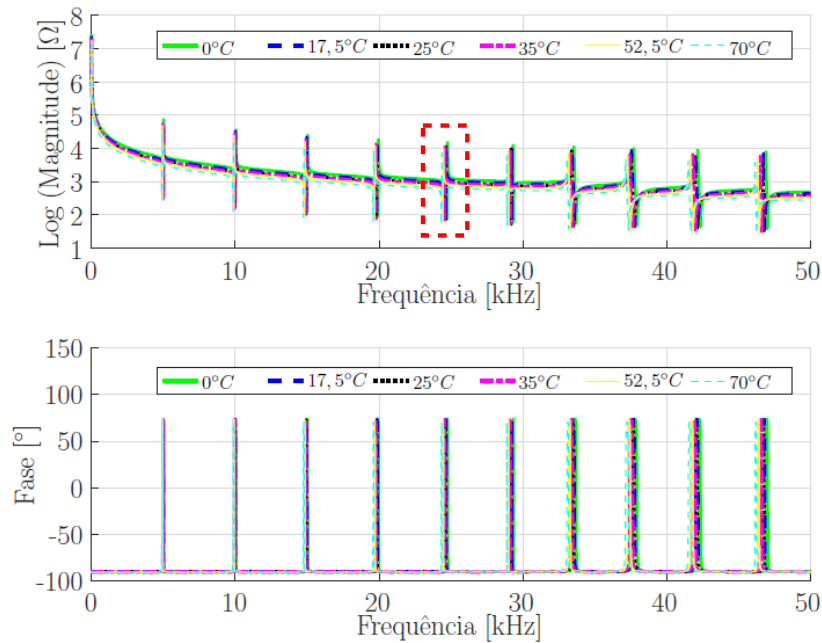
Apesar de vários estudos demonstrarem a viabilidade da aplicação da técnica de EMI, problemas práticos têm impossibilitado a sua eficiente e confiável utilização em estruturas reais, sendo os efeitos da temperatura citados na literatura como um dos mais críticos e desafiadores (Baptista et al. 2014).

1.4 Efeito da temperatura nas curvas de Impedância

As estruturas estão sempre sujeitas as variações de temperatura, sejam elas devido as condições externas ou internas, como aquecimento durante a operação. Além disso, a temperatura é um fator determinante para as propriedades dos materiais, podendo alterar significativamente os seus valores. No caso da técnica da impedância eletromecânica, a temperatura afeta as propriedades do transdutor piezoelétrico e da estrutura, podendo ocasionar em diagnósticos incorretos durante o monitoramento da integridade estrutural. Em vista disso, os seus efeitos são considerados um dos mais críticos problemas práticos enfrentados ao aplicar a técnica EMI no monitoramento da integridade de estruturas reais (Baptista et al. 2014).

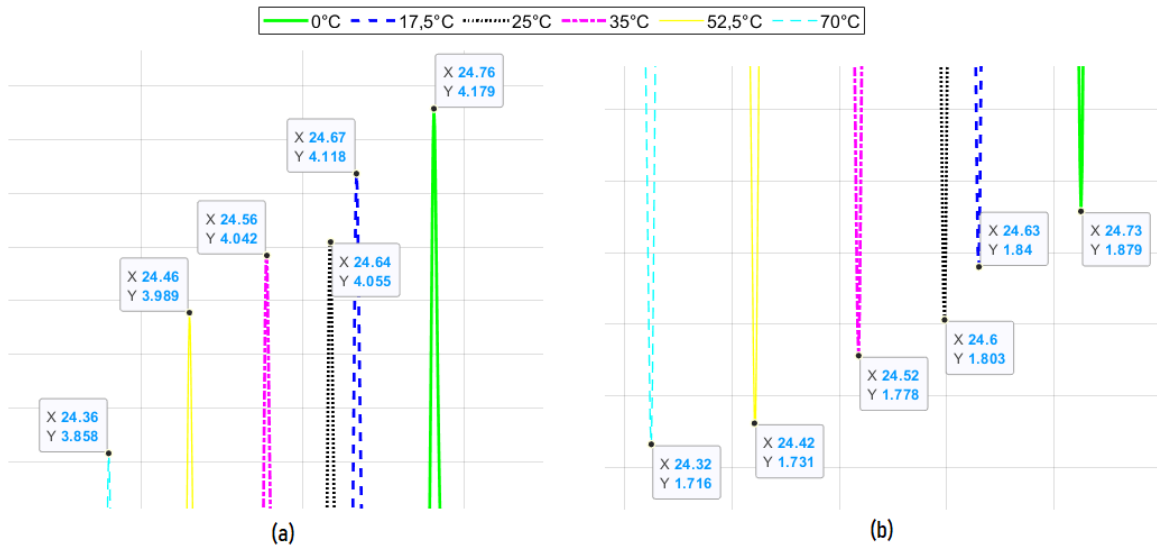
Pesquisas demonstram que as variações de temperatura provocam alterações significativas nos valores da frequência (eixo horizontal) e amplitude (eixo vertical), além da suavização dos picos das curvas da impedância eletromecânica, como pode ser observado nas Figuras 3 e 4, na qual analisa-se o efeito desta propriedade nas curvas de IE obtidas pela modelagem de uma barra de alumínio 2024 usando o método dos elementos espectrais (SEM, do inglês *Spectral Element Method*) (Lee 2009). A temperatura foi simulada mediante a consulta ao *datasheet* do fabricante da cerâmicas piezoelétrica, do qual determinou-se a sua constante dielétrica $\bar{\epsilon}_{33}^T$, a constante piezoelétrica d_{31} e o fator de perda mecânica η para 5 pontos de temperatura: 0°C, 17,5°C, 35°C, 52,5°C e 70°C. Enquanto que a influência da temperatura na viga foi baseada no estudo realizado por Brammer & Percival (1970), no qual determinou-se o módulo de Young E para os 5 pontos de temperatura citados anteriormente. Observa-se que as frequências naturais e as amplitudes diminuem com o aumento da temperatura, sendo que essas mesmas tendências foram verificadas por demais autores como Sepehry et al. (2010) e Park et al. (1999). Portanto, essas mudanças nos sinais da impedância devido às variações de temperatura podem ocasionar em diagnósticos errados sobre a integridade da estrutura analisada, i.e, indicar danos quando estes não estão presentes (falso positivo) ou manifestar que não há presença de danos mesmo quando estes situam-se na estrutura monitorada (falso negativo). Sendo assim, uma estratégia capaz de compensar esses efeitos é necessária para aplicações reais da técnica da impedância eletromecânica em SHM (Koo et al. 2009).

Figura 3: Magnitude e fase da Impedância Eletromecânica considerando variações nas propriedades do PZT e da estrutura devido às alterações da temperatura.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Figura 4: Aproximação no quinto pico e vale da Impedância Eletromecânica apresentada na Figura 3: (a) pico e (b) vale.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Em aplicações práticas da técnica de impedância, para realizar o monitoramento da integridade estrutural, é esperado que as condições ambientais apresentem variações quando comparadas com as condições ambientais controladas em laboratórios. Desta forma, várias pesquisas analisam estas influências, desenvolvendo estratégias para

compensar os efeitos nas curvas de impedância devido, por exemplo, a variações de temperatura. Dentre eles, estão Krishnamurthy et al. (1996), os quais, por meio de investigação experimental, definem um coeficiente de temperatura independente da frequência considerando que observaram uma variação linear para o PZT PSI-5A na faixa de 80°F (27°C) a 160°F (71°C). A partir deste coeficiente, implementaram uma técnica simples de compensação de temperatura, eliminando os efeitos da temperatura nos sensores PZT, mas não eliminando seus efeitos na estrutura mecânica. Lim et al. (2011) desenvolvem uma técnica de normalização de dados usando a análise de componentes principais do Kernel (KPCA, do inglês *Kernel principal component analysis*) a fim de melhorar a detectabilidade de danos sob temperatura variável e condições de carregamento externo, cujos testes foram realizados em um asa de aeronave em escala real e de modelo.

Sepehry et al. (2010) investigam os efeitos da temperatura ambiente ou de serviço nas propriedades do PWAS (do inglês, *piezoelectric wafer active sensors*) e da estrutura aplicados a um sistema SHM via impedância eletromecânica. Os autores observaram que o transdutor piezoelétrico é responsável pelos deslocamentos em amplitude dos sinais, enquanto que o deslocamento horizontal (frequência) está associado às mudanças nas constantes da estrutura. Sepehry et al. (2011) empregam um novo método utilizando redes neurais artificiais (ANN, do inglês *artificial neural networks*) baseado na função de base radial (RBF, do inglês *radial basis function*) para compensar o efeito da temperatura no índice de danos. Bastani et al. (2012) utilizam um método utilizando uma matriz de sensores e análise estatística para identificar mudanças de sinal derivadas de dano e/ou mudança ambiental.

Sun et al. (1995b) utilizam a correlação cruzada entre o *baseline* e os sinais de impedância desconhecidos para compensar as mudanças provocadas devido as variações de temperatura. Park et al. (1999) compensam os deslocamentos de frequência e magnitude usando um índice métrico RMSD (do inglês *root mean square deviation*) modificado. Enquanto que Koo et al. (2009) alteram a técnica desenvolvida por Park et al. (1999) para desenvolver um deslocamento de frequência eficaz (EFS, do inglês *effective frequency shift*) para compensar os efeitos da temperatura. Este método buscou maximizar o coeficiente de correlação cruzada entre o *baseline* e as assinaturas de impedâncias atualizadas. Baptista et al. (2014) estudam os efeitos da temperatura na técnica IE, além de estudarem mais profundamente o método de deslocamento de frequência eficaz de Koo et al. (2009), observando que a mudança de frequência não é constante, mas aumenta com a frequência de excitação, exigindo uma banda de frequência estreita para um melhor resultado. Grisso & Inman (2010), por outro lado, estudam especificamente os efeitos da temperatura no transdutor piezoelétrico e como compensá-los, desenvolvendo uma simples técnica baseada na inclinação da susceptância piezoelétrica, a qual seria capaz de diferenciar um sensor piezoelétrico

danificado daquele sem dano.

Diante do exposto, o presente trabalho almeja analisar a viabilidade das técnicas de compensação de Park et al. (1999), Koo et al. (2009), Baptista et al. (2014), Grisso & Inman (2010) para amenizar os efeitos da temperatura nas curvas de impedância eletromecânica, visto que estas técnicas são as mais citadas na literatura. Para tal, utilizou-se os dados experimentais aferidos no ensaio de uma viga de alumínio cuja temperatura varia de -10 °C a 80 °C. Nesta estrutura dois tipos de danos são simulados: acréscimo de massa e corte, ou seja, uma redução de massa. A seguir, aplicou-se cada uma das técnicas de computação mediante o uso do *software* Python, sendo possível verificar a eficácia de cada método para os sinais sem dano e com dano.

1.5 Objetivos

O objetivo principal deste trabalho de graduação é analisar a viabilidade do uso de algumas técnicas de compensação para minimizar o efeito da temperatura nas curvas de impedância eletromecânica e assim proporcionar adequado monitoramento estrutural.

1.6 Organização do Trabalho

Este trabalho de graduação está estruturado em cinco capítulos, referências bibliográficas e um apêndice. Em detalhes, tem-se:

- Capítulo 1 – **Introdução:** apresenta uma revisão dos princípios básicos relacionados aos principais temas envolvidos no trabalho: SHM, transdutores piezelétricos, a técnica de impedância Eletromecânica e os efeitos da temperatura nas curvas de IE, além de uma discussão sobre os trabalhos existentes na literatura que abordam esses temas; objetivos e estrutura da dissertação;
- Capítulo 2 – **Metodologia:** apresenta a metodologia da técnica de EMI e das quatro técnicas de compensação que serão estudadas, além de apresentar as equações de dois índices métricos: RMSD e CCDM;
- Capítulo 3 – **Dados experimentais:** descrição dos ensaios realizados para coleta dos sinais com o método da Impedância Eletromecânica e apresentação dos dados selecionados para os estudos ao longo deste trabalho;
- Capítulo 4 – **Resultados e Discussões:** análise de cada uma das técnicas de compensação, assim como dos valores obtidos para os índices métricos;

- Capítulo 5 – **Considerações Finais:** relata-se as conclusões e algumas sugestões para trabalhos futuros;
- **Referências Bibliográficas;**
- **Apêndice A - Códigos do Python:** apresenta os códigos utilizados para a resolução deste trabalho.

2 Metodologia

Este capítulo apresenta a descrição dos métodos e procedimentos empregados para o desenvolvimento deste trabalho de graduação

2.1 Impedância Eletromecânica

A técnica da Impedância Eletromecânica consiste na utilização de um ou mais transdutores piezoelétricos como sensor(es) e atuador(es). Estes dispositivos são responsáveis por realizar o acoplamento entre impedância mecânica da estrutura e a impedância elétrica do PZT, a partir do qual realiza-se o monitoramento estrutural do objeto em estudo. A Impedância Eletromecânica (EMI) é obtida como a razão entre a voltagem aplicada ao PZT, $V_{in}(\omega)$, e corrente que passa pelo mesmo, $I_{out}(\omega)$:

$$Z_{EM}(\omega) = \frac{V_{in}(\omega)}{I_{out}(\omega)} \quad (1)$$

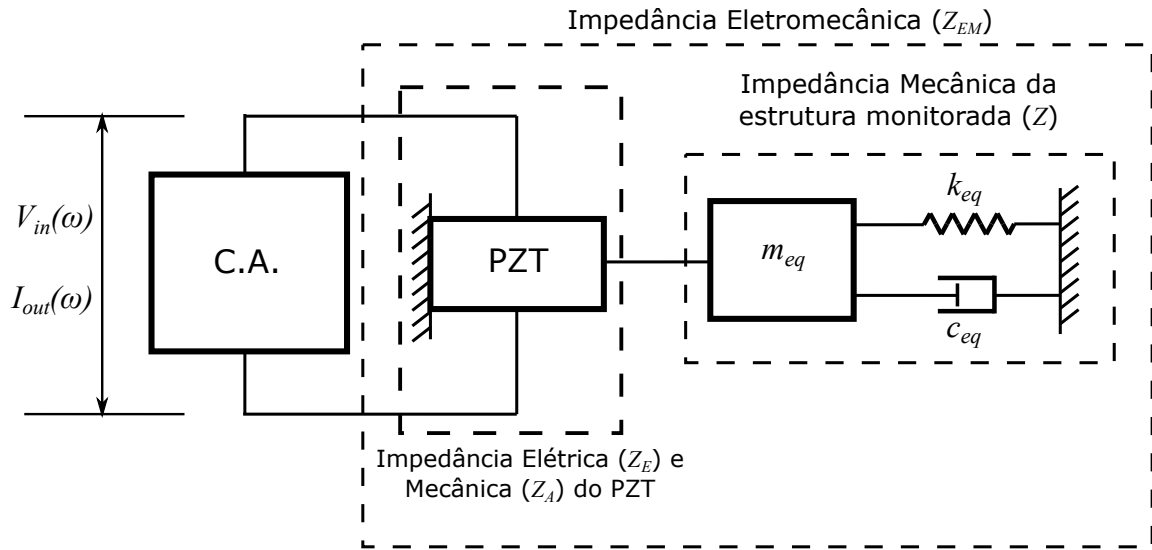
Na Figura 5, tem-se a representação da interação entre o PZT e uma estrutura de um grau de liberdade, massa (m_{eq}), mola (k_{eq}) e amortecimento (c_{eq}). Este transdutor é considerado como uma barra fina exposta a uma vibração axial em resposta a aplicação de uma voltagem alternada, $V_{in}(\omega)$. Uma extremidade é fixa e a outra é conectada na estrutura, representada por um sistema de um grau de liberdade. Dependendo do refinamento necessário, esta estrutura pode tornar-se mais complexa e completa. Um circuito elétrico auxiliar (C. A.) é utilizado para realizar a medição da corrente elétrica, $I_{out}(\omega)$.

De acordo com a equação apresentada por Liang et al. (1996) em termos da admitância (Y_{EM}), representado na Eq. (2), é possível obter a Impedância Eletromecânica do modelo da Figura 5, visto que esta é o inverso da admitância e vice-versa.

$$Y_{EM}(\omega) = j\omega \frac{w_A l_A}{h_A} \left[\bar{\epsilon}_{33}^T - \frac{Z(\omega)}{Z_A(\omega) + Z(\omega)} d_{31} \bar{Y}_{11}^E \right] \quad (2)$$

onde $Y_{EM}(\omega)$ é a admitância (inverso da impedância eletromecânica), o comprimento, a largura e a espessura do PZT são l_A , w_A e h_A , respectivamente, $\bar{\epsilon}_{33}^T$ é a constante dielétrica do PZT na direção 3-3 (z) sob uma tensão constante, d_{31} é a constante piezoelétrica, ω é a frequência angular, $\bar{Y}_{11}^E$ é o módulo de elasticidade complexo do PZT na direção 1-1 (x) sob um campo elétrico constante, $j = \sqrt{-1}$ representa o número imaginário puro, $Z(\omega)$ e $Z_A(\omega)$ são, respectivamente, a impedância mecânica da estrutura e do PZT.

Figura 5: Representação da Impedância Eletromecânica de um modelo simplificado de 1 g.d.l. acoplado a um PZT de barra.



Fonte: Adaptado de Liang et al. (1996).

2.2 Técnicas de Compensação

Os sinais de impedância eletromecânica são diretamente afetados pelas mudanças nas propriedades da estrutura e dos transdutores piezoelétricos (Abbas et al. 2021). Consequentemente, a temperatura atua como um fator-chave para o desempenho de um sistema SHM, visto que esta é responsável por alterar significativamente as propriedades dos materiais. Essas variações são observadas como deslocamentos nas frequências naturais (i.e, os picos e vales de ressonância e antirressonância, respectivamente, nos sinais de impedâncias) e magnitude. Em vista disso, o diagnóstico da estrutura pode ocasionar em falsos positivos ou negativos, prejudicando o objetivo principal do monitoramento da integridade estrutural.

Por conseguinte, diversos pesquisados buscaram formas de neutralizar os efeitos da temperatura nas curvas da impedância eletromecânica por meio de estratégias conhecidos como técnicas de compensação. Entre essas, destaca-se aquelas desenvolvidas por Park et al. (1999), Koo et al. (2009), Baptista et al. (2014) e Grisso & Inman (2010), as quais são explicadas a seguir.

2.2.1 Técnica desenvolvida por Park et al. (1999)

Com o objetivo de desenvolver uma estratégia capaz de considerar os efeitos da temperatura na estrutura e nos transdutores piezoelétricos, assim como evitar técnicas

que envolvessem a modelagem analítica dos fenômenos envolvidos, as quais se tornariam pouco práticas em estruturas complexas, Park et al. (1999) apresentam uma técnica baseada em uma abordagem empírica a fim de minimizar os efeitos da temperatura no método de SHM baseado em impedância. O procedimento para realizar a compensação é baseado no cálculo de V_a , o qual é definido da seguinte forma:

$$V_a = \sum_{i,j=1}^N [Re(Z_R(\omega_i)) - Re(Z_D(\omega_j))]^2 \quad (3)$$

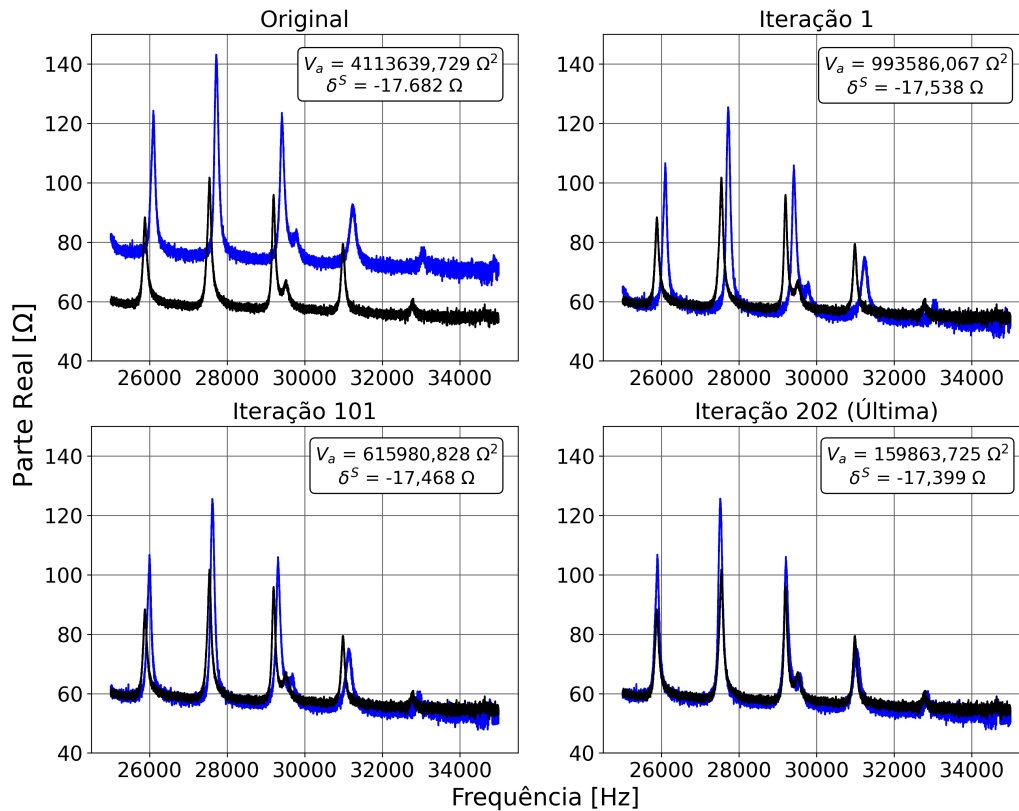
em que V_a representa a soma do quadrado da variação da parte real da impedância, N é o número de pontos de frequência, $Re(Z_R(\omega_i))$ é a parte real da impedância de referência (Z_R) na frequência i e $Re(Z_D(\omega_j))$ é a parte real da impedância desconhecida (Z_D) na frequência j (defasado em relação ao i), a qual é calculada conforme a Eq. (4). O cálculo de V_a permite obter alguma indicação do nível de dano em comparação com a medição de referência. Em trabalhos antigos, utiliza-se o mesmo i e j , porém, na técnica de Park et al. (1999), j varia, aproveitando-se do fato que a alteração na impedância é dominada pelo deslocamento horizontal. A impedância desconhecida $Z_D(\omega_j)$ pode ser gerada a partir da impedância desconhecida medida de acordo com a seguinte relação:

$$Re(Z_D(\omega_j)) = Re(Z_D(\omega_j)_{medido}) + \delta^S \quad (4)$$

sendo δ^S definido como a média da diferença entre a curva de impedância de referência e a curva de impedância medida. Os valores de $(j - i)$ e δ^S podem ser encontrados por iteração ao deslocar as curvas de impedâncias para a direita, no caso de temperaturas acima da temperatura referência, ou para a esquerda, para temperaturas inferiores a de referência, até que o valor mínimo de V_a seja atingido.

A Figura 6 apresenta o comportamento da parte real das curvas de impedância eletromecânica com a aplicação da técnica de Park et al. (1999). Os sinais foram obtidos de uma viga de alumínio na condição sem dano para uma temperatura de 10 °C e 30 °C (referência). Percebe-se que após 1 iteração, já ocorre a compensação do eixo vertical, através da soma de δ^S ao sinal desconhecido. Além disso, esta variável apresenta uma baixa variação mesmos após múltiplas iterações. Isso ocorre pois δ^S é calculado como a diferença entre Z_R e o sinal medido deslocado apenas horizontalmente, a fim de empregar o seu valor atualizado em cada iteração.

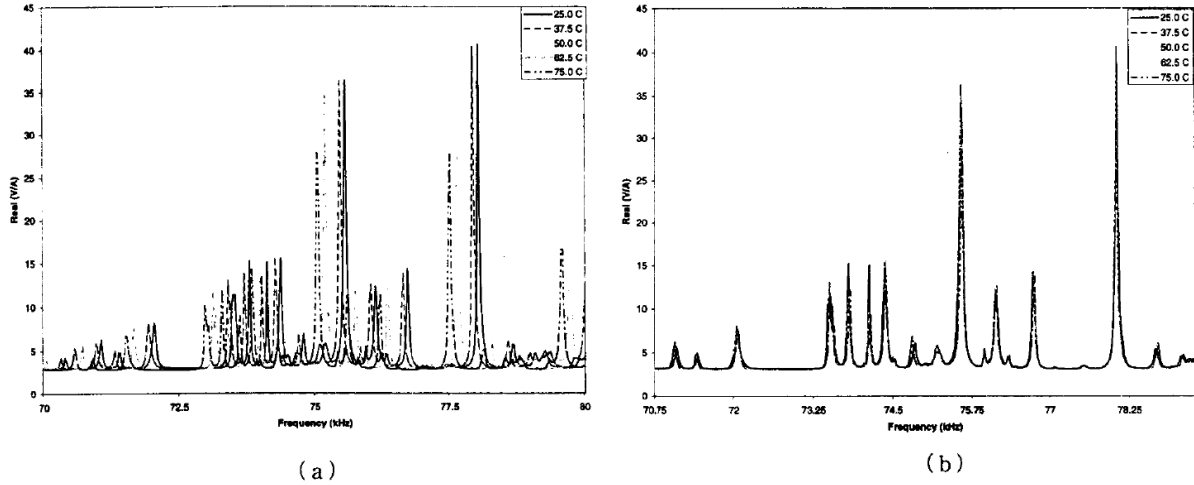
Figura 6: Parte real da impedância eletromecânica em diferentes iterações da técnica de Park et al. (1999) para o sinal de referência (preto) e desconhecido (azul).



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Mediante o emprego dessa estratégia de compensação, Park et al. (1999) verificam que é possível detectar danos na fase incipiente, mesmo com a variação de temperatura de 25°C a 75°C com um passo de 12,5°C. Os experimentos foram realizados em diferentes faixas de frequência de acordo com a estrutura monitorada: viga de aço carbono (70 kHz a 80 kHz), junta de tubo aparafusada (70 kHz a 80 kHz), engrenagens (190 kHz a 220 kHz) e estrutura reforçada de compósito (54 kHz a 63 kHz). Na Figura 7 é apresentado a parte real da impedância elétrica de uma viga de aço carbono obtida por Park et al. (1999) antes e após a aplicação da técnica de compensação.

Figura 7: Parte real da impedância elétrica de uma viga de aço carbono com variação da temperatura: (a) não compensada e (b) compensada.



Fonte: Park et al. (1999).

2.2.2 Técnica desenvolvida por Koo et al. (2009)

A fim de compensar a variação da impedância devido à mudança de temperatura, Koo et al. (2009) utilizam uma técnica de compensação baseada na correlação cruzada entre os dados da impedância de referência e da impedância aferida. Neste estudo, os autores determinam o deslocamento de frequência eficaz (EFS) mediante a análise do coeficiente de correlação cruzada (C_C). O $EFS(\tilde{\omega})$ para uma dada impedância Z_D é definido como o deslocamento correspondente à correlação cruzada máxima com relação aos dados da impedância de referência Z_R , como demonstrado a seguir:

$$\max_{\tilde{\omega}} C_C = \max_{\tilde{\omega}} \frac{\{1/N \sum_{i=1}^N (Z_R(\omega_i) - \bar{Z}_R)(Z_D(\omega_i - \tilde{\omega}) - \bar{Z}_D)\}}{\sigma_{Z_R} \sigma_{Z_D}} \quad (5)$$

em que $\bar{Z}_R$ e $\bar{Z}_D$ são os valores médios das duas assinaturas de impedância $Z_R(\omega)$ e $Z_D(\omega)$; σ_{Z_R} e σ_{Z_D} são seus desvios padrões, respectivamente, e $\tilde{\omega}$ representa o valor da frequência deslocada durante o cálculo do valor máximo de C_C . Nesta técnica de compensação, o sinal de impedância é deslocado em cada iteração a fim de obter o valor máximo de C_C , em que as curvas com temperaturas acima da temperatura de referência são submetidas a um deslocamento para a direita, enquanto as demais são deslocadas para a esquerda. As Eqs. (6) e (7) apresentam um cálculo genérico para a média e desvio padrão (σ). Estas são empregadas em ambos os sinais (de referência e desconhecido) e são recalculados após cada iteração.

$$Media = \frac{\sum_{i=1}^N x_i}{N} \quad (6)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - Media)^2}{N}} \quad (7)$$

em que x_i representa a variável em análise na posição i , a qual, nesta pesquisa, simboliza $Z_R(\omega_i)$ e $Z_D(\omega_i)$ e N representa o número de pontos, simbolizando a quantidade de pontos em frequência na técnica de Koo et al. (2009). O cálculo do valor máximo de C_C é responsável pela compensação apenas do deslocamento horizontal. Este método também pode atuar na compensação do deslocamento vertical ao subtrair os valores médios do sinal original de referência e do sinal desconhecido deslocado horizontalmente. Porém, os autores trabalham com as impedâncias normalizadas, calculadas como apresentada a seguir.

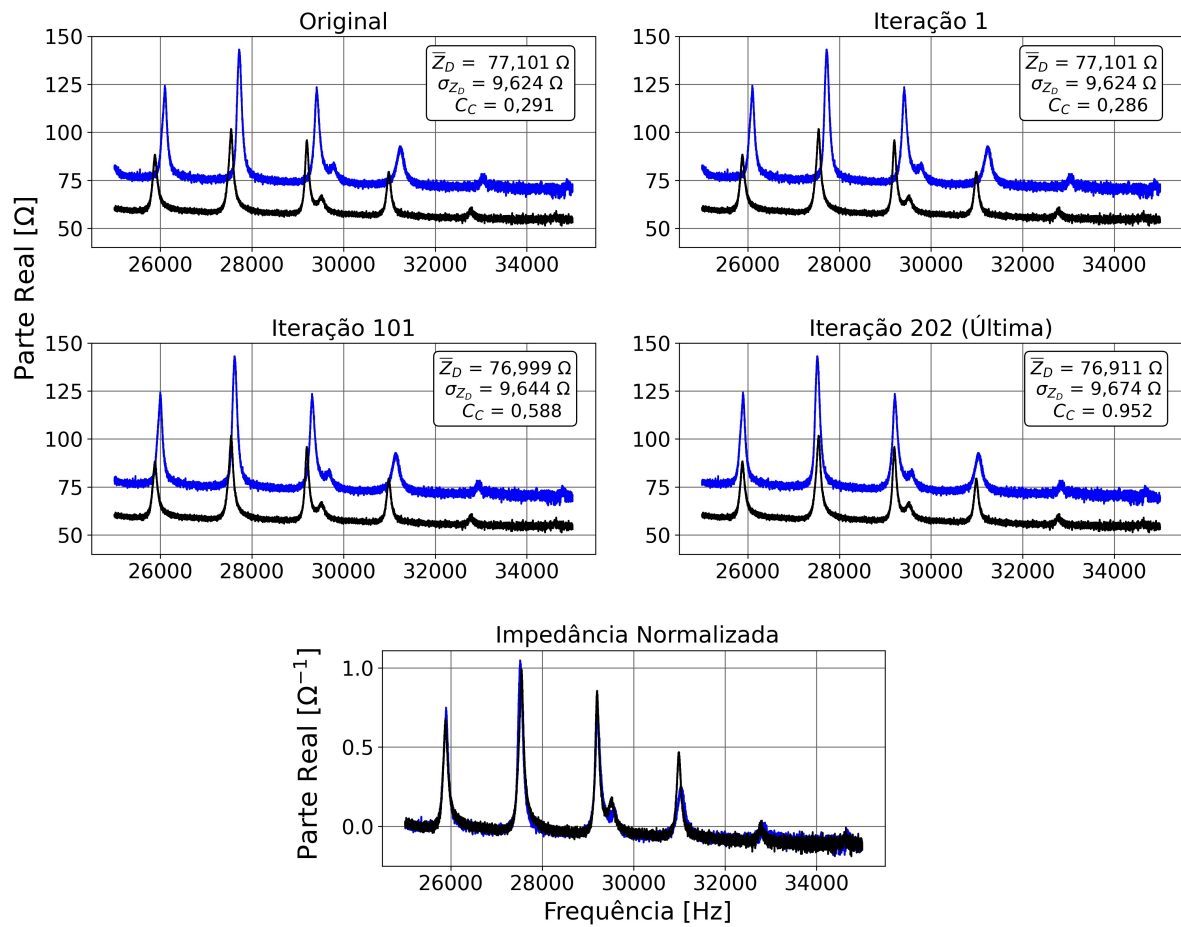
$$\hat{Z}_D(\omega) = \frac{(Z_D(\omega - \tilde{\omega}) - \bar{Z}_D)}{\sigma_{Z_R} \sigma_{Z_D}} \quad (8)$$

sendo $\hat{Z}_D(\omega)$ a impedância normalizada nos dois eixos (amplitude e frequência). A normalização é responsável por alterar os sinais para que todos estejam na mesma escala. Esta etapa também é efetuada na impedância de referência Z_R , porém esta não apresentará um deslocamento de frequência $\tilde{\omega}$, i.e., será utilizado o sinal original, e o denominador equivale ao quadrado do seu desvio padrão σ_{Z_R} :

$$\hat{Z}_R(\omega) = \frac{(Z_R(\omega) - \bar{Z}_R)}{\sigma_{Z_R}^2} \quad (9)$$

A Figura 8 apresenta o comportamento das curvas de impedância eletromecânica com a aplicação da técnica de Koo et al. (2009). Os sinais foram obtidos de uma viga de alumínio na condição sem dano para uma temperatura de 10 °C e 30 °C (referência). Os valores de $\bar{Z}_D$ e σ_{Z_D} sofrem pouca variação, enquanto percebe-se o aumento de C_C . Além disso, a compensação do eixo vertical apenas ocorre quando aplica-se as Eqs. (9) e (8) para determinar a impedância normalizada.

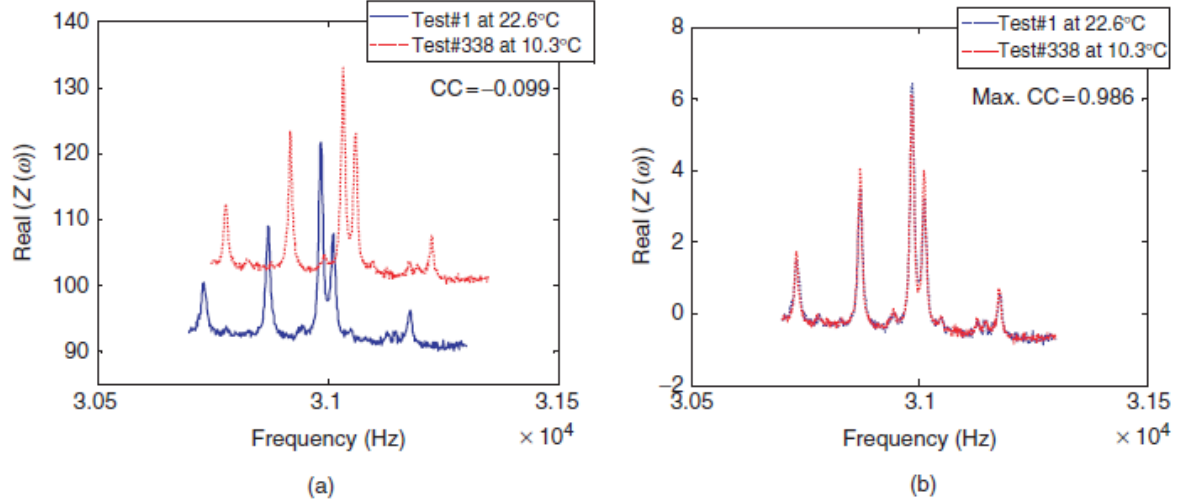
Figura 8: Curvas de impedância eletromecânica em diferentes iterações da técnica de Koo et al. (2009) para o sinal de referência (preto) e desconhecido (azul).



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Os dados de impedância coletados por Koo et al. (2009) durante um período de mais de 10 dias, no decorrer do qual a temperatura variou de 10,3°C a 26,0°C. As faixas de frequência variavam de 30,5 kHz a 31,5 kHz. Além disso, apenas para a condição *baseline*, os autores realizaram 700 medições. Na Figura 9 tem-se a parte real da impedância obtida do ensaio experimental realizado em uma armação de aço na condição sem dano. É apresentado as assinaturas das impedâncias originais e aquelas normalizadas após o EFS, sendo que considerou-se o sinal obtido a 22,6°C como referência.

Figura 9: Parte real da impedância de duas medições na condição sem dano de uma armação de aço com apenas variação de temperatura: (a) não compensada e (b) compensada.



Fonte: Koo et al. (2009).

Em sua pesquisa, Koo et al. (2009) observam que o método EFS pode reduzir significativamente os efeitos da variação de temperatura na detecção de danos. Entretanto, mesmo após a sua aplicação, os valores de C_C diminuíram rapidamente com o aumento do nível de dano, indicando uma limitação nesta técnica de compensação.

2.2.3 Técnica desenvolvida por Baptista et al. (2014)

A técnica desenvolvida por Baptista & Filho (2009) é baseada naquela elaborada por Koo et al. (2009), os quais adotaram um EFS para compensar os efeitos da temperatura. Como dito anteriormente, o método baseado em EFS consiste em deslocar a curva da impedância atual em relação ao *baseline*, com o objetivo de maximizar o coeficiente de correlação cruzada C_C , a qual calcula-se pela Eq. (10).

$$C_C = \frac{\sum_{i=1}^N [Z_R(\omega_i) - \bar{Z}_R][Z_D(\omega_i) - \bar{Z}_D]}{\sqrt{\sum_{i=1}^N [Z_R(\omega_i) - \bar{Z}_R]^2} \sqrt{\sum_{i=1}^N [Z_D(\omega_i) - \bar{Z}_D]^2}} \quad (10)$$

No entanto, antes de analisar o sinal da impedância desconhecida, Baptista et al. (2014) sugerem que esta deve ser continuamente deslocada usando uma rotina de *loop* até que o coeficiente de correlação máximo C_C (idealmente, $C_C = 1$) seja obtido. No caso de um aumento da temperatura, tem-se um deslocamento de frequência para

a esquerda (Δf é negativo). Sendo assim, o sinal da impedância atual deve ser deslocada na direção oposta (para a direita) para maximizar o coeficiente de correlação, conforme mostrado abaixo:

$$Z_{Dj}(\omega_i) = Z_{D(j-1)}(\omega_i - d_f), \quad \Delta f < 0 \quad (11)$$

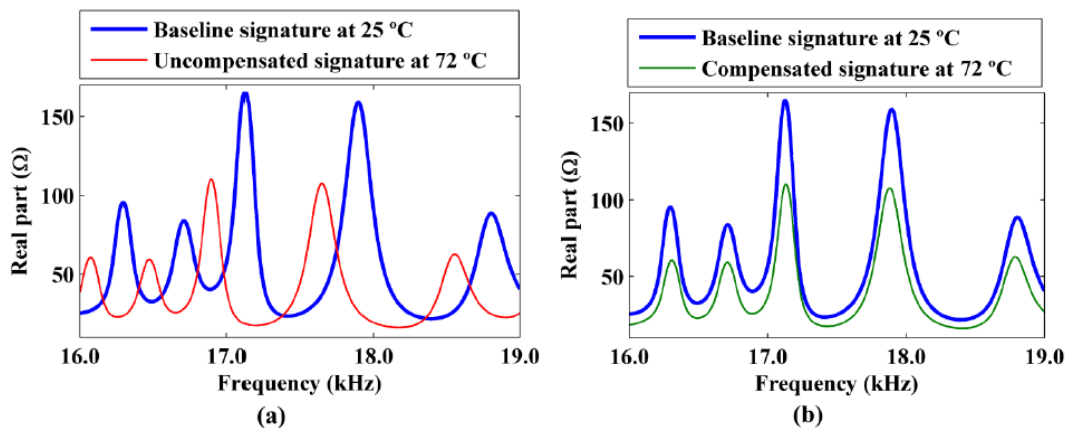
em que d_f é o passo de frequência fornecido pelo sistema de medição, e o subscrito (j) denota o número da iteração. Por outro lado, a assinatura da impedância para uma diminuição da temperatura deve ser deslocada para a esquerda:

$$Z_{Dj}(\omega_i) = Z_{D(j-1)}(\omega_i + d_f), \quad \Delta f > 0 \quad (12)$$

O comportamento das curvas de impedância com a aplicação da técnica de Baptista et al. (2014) equivale àquela apresentada na Figura 8, excetuando-se o último gráfico contendo a impedância normalizada, visto que ambas as técnicas realizam a compensação horizontal ao maximizar o valor de C_C .

Os sinais de impedância eletromecânica coletados por Baptista et al. (2014) foram obtidos para uma faixa de frequência de 0-550 kHz, com passo de 2 Hz. Enquanto que a temperatura variou de 25 °C a 102 °C. A Figura 10 mostra a parte real não compensada e compensada da impedância de uma viga de alumínio aferida a 72 °C em relação à assinatura do *baseline* obtida a 25 °C para uma faixa de frequência de 16–19 kHz. Percebe-se que no caso desta técnica, apenas o deslocamento horizontal (frequência) foi compensado, enquanto o vertical (amplitude) manteve-se igual ao original.

Figura 10: Parte real da assinatura de impedância de uma viga de alumínio a 72 °C e 25 °C: (a) não compensada e (b) compensada.



Fonte: Baptista et al. (2014).

Apesar de sua simplicidade e viabilidade deste método para uma abrangente variedade de estruturas, sua eficiência diminui se uma ampla banda de frequência for utilizada (Baptista et al. 2014). Essa limitação ocorre porque o deslocamento de

frequência dos picos de ressonância (Δf) não é constante em toda a faixa de frequência, mas aumentam com a mesma. Consequentemente, uma boa correspondência entre as curvas é obtido entre picos que exibem aproximadamente o mesmo valor de Δf . Ou seja, o coeficiente de correlação máximo (C_C) obtido com este método de compensação diminuiu com o aumento da banda de frequência. Em contrapartida, bandas de frequência mais largas podem incluir mais picos de ressonância e, consequentemente, aumentar a sensibilidade do sistema para detectar danos estruturais, principalmente danos incipientes. Portanto, a largura da banda de frequência é uma questão crítica para as técnicas de compensação baseadas na mudança de frequência.

2.2.4 Técnica desenvolvida por Grisso & Inman (2010)

Ao contrário dos demais autores, Grisso & Inman (2010) concentram sua pesquisa no comportamento dos sensores a fim de desenvolver um algoritmo simples, eficaz e capaz de detectar sensores piezoelétricos com defeitos. Para tal, eles analisaram as curvas da susceptância piezoelétrica, ou parte imaginária da admitância, observando o padrão do comportamento da susceptância daqueles sem e com dano (deslocados e quebrados). Selecionou-se esta propriedade, pois é mais sensível a mudanças na camada de ligação e pode ser usado para identificar a descolagem (Bhalla & Soh 2004). Além disso, os autores também almejavam desenvolver uma técnica capaz de separar os efeitos das variações de temperatura daqueles resultantes de defeitos no sensor.

Primeiramente, os autores definiram que a susceptância seria observada na faixa de 1–20 kHz para cada PZT, visto que estudos anteriores indicaram que a sua inclinação neste intervalo é linear. A cada temperatura em que os dados foram coletados, a equação da reta que mais se adequava à susceptância B era determinada, conforme apresentado na Eq. (13).

$$B = mf + b, \quad 1000 \text{ Hz} < f < 20000 \text{ Hz} \quad (13)$$

em que m é a inclinação da susceptância e b o valor que intercepta o eixo y .

Depois que cada inclinação m é registrada, a sua tendência geral é observada ao traçar o valor da inclinação da susceptância em função da temperatura. Dessa forma, é possível separar os sensores piezoelétricos que apresentam algum defeito daqueles na condição sem falha. Estes são empregados para definir os limites dentro do qual um sensor sem dano deveria estar inserido, enquanto aqueles fora deste intervalo provavelmente possuem algum tipo de defeito. Ao determinar essa faixa aceitável de atuação dos sensores, é possível diferenciar os efeitos das variações da temperatura

daqueles provocados por sensores danificados e, conseqüentemente, descartar seus usos para o diagnóstico da estrutura. As equações utilizadas para determinar a média entre as curvas de inclinação dos sensores na condição sem dano e os limites superiores (S_{high}) e inferiores (S_{low}) da faixa aceitável de atuação estão apresentadas nas Eqs. (14) e (15).

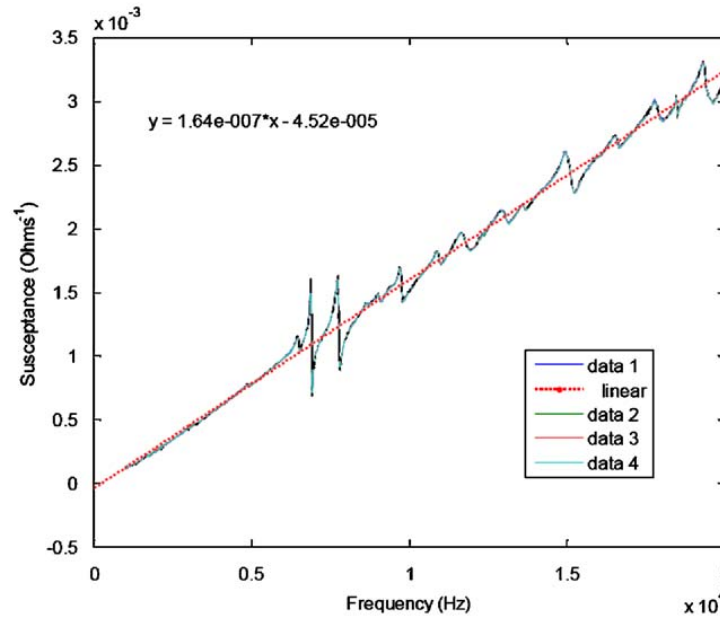
$$S = \mu_m T + \mu_b \quad (14)$$

$$\begin{aligned} S_{high} &= (\mu_m + n\sigma_m)T + (\mu_b + n\sigma_b) \\ S_{low} &= (\mu_m - n\sigma_m)T + (\mu_b - n\sigma_b) \end{aligned} \quad (15)$$

em que T é a temperatura em °C, μ_m é a média dos valores de inclinação de susceptância, μ_b a média dos valores que interceptam o eixo y da susceptância, σ_m é o desvio padrão dos valores de inclinação da susceptância, σ_b o desvio padrão dos valores relacionados às intercepções em y e n o número de desvios padrões a serem usados.

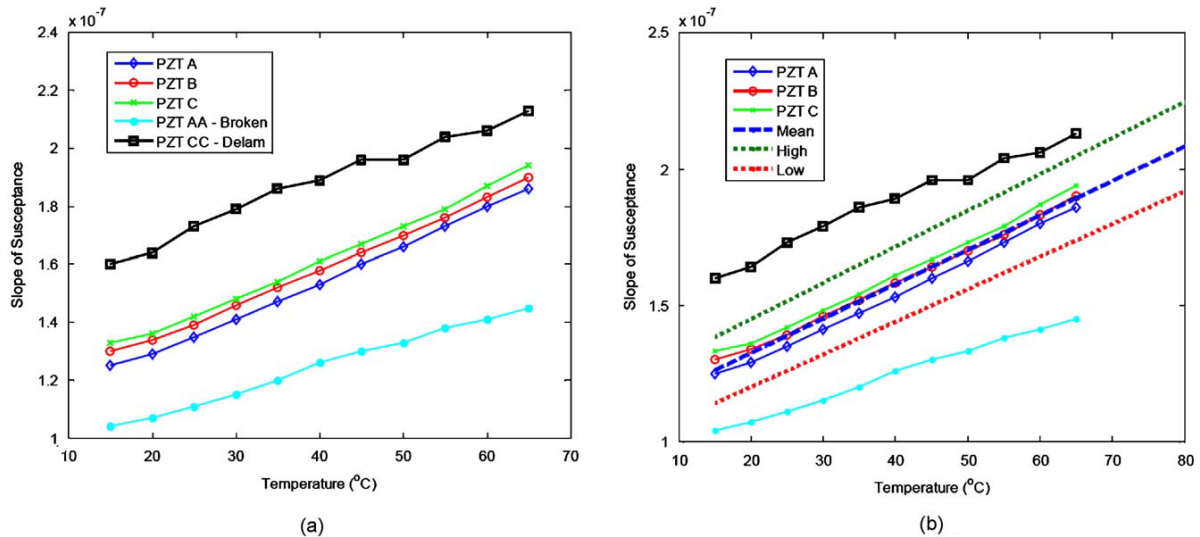
Os dados experimentais coletados por Grisso & Inman (2010) foram obtidos para o monitoramento de um quadro estrutural de alumínio com mecanismos de fixação, no qual estava acoplado piezoelétricos em diferentes situações: sem dano, quebrado e delaminado (descolado). A faixa de temperatura analisada foi de 15°C a 65°C, em incrementos de 5°C. A Figura 11 apresenta susceptância em uma faixa de 1-20 kHz, assim como a equação da reta que descreve seu comportamento. A Figura 12-(a) exibe a inclinação (ou, do inglês, *slope*) da susceptância em função da temperatura para as diferentes condições dos sensores piezoelétricos: PZT A, B e C não possuem danos; PZT AA está com 25% da sua parte superior quebrada e PZT CC apresenta uma delaminação de 50%. Nota-se que os sensores descolados estão acima das curvas dos sensores na condição sem dano, enquanto os quebrados possuem valores de inclinação abaixo destes. Por fim, a Figura 12-(b) mostra os limites do intervalo associado a um sensor sem defeito.

Figura 11: Curva da susceptância de um sensor na condição sem dano a 45°C.



Fonte: Grisso & Inman (2010).

Figura 12: Os valores de inclinação dos: (a) três sensores sem danos (PZT A, B e C) e dos dois danificados (PZT AA e CC) e (b) os limites indicando o intervalo associado a um sensor sem defeito.



Fonte: Grisso & Inman (2010).

A maior vantagem deste método é sua relativa simplicidade e facilidade de implementação. Porém, ao contrário das demais técnicas de compensação, esta necessita que medições de temperatura precisas sejam incluídas com a aquisição de cada sinal de impedância.

2.3 Índices Métricos

A caracterização quantitativa dos danos é realizada usando índices métricos. Os mais amplamente empregados são o índice métrico conhecido como desvio médio quadrático (RMSD) e a métrica do desvio do coeficiente de correlação (CCDM, do inglês *correlation coefficient deviation metric*). Estas métricas de danos comparam dois sinais de impedância, em que um deles é obtido para a estrutura sem dano (valor de referência) e o outro é a impedância desconhecida.

2.3.1 RMSD

O cálculo deste índice é apresentado na Eq. (16), sendo que um alto valor de RMSD significa uma maior probabilidade da presença de um dano. Este índice é mais sensível às variações na amplitude das curvas de impedância (Koo et al. 2009, Baptista et al. 2014).

$$RMSD = \sum_{i=1}^N \sqrt{\frac{[Z_D(\omega_i) - Z_R(\omega_i)]^2}{[Z_R(\omega_i)]^2}} \quad (16)$$

2.3.2 CCDM

O cálculo de índice CCDM é apresentado na Eq. (17). Ele é mais sensível às mudanças no eixo da frequência, ao contrário do índice RMSD (Baptista et al. 2014).

$$CCDM = 1 - C_C \quad (17)$$

O cálculo de C_C pode ser efetuado utilizando tanto a Eq. (5) quanto a Eq. (10), visto que ambas geram os mesmos resultados.

3 Dados experimentais

Este capítulo apresenta a descrição dos ensaios realizados para coleta dos sinais de impedância eletromecânica e os dados selecionados para a análise das técnicas de compensação de temperatura.

3.1 Setup Experimental

Para este trabalho, utilizou-se os dados coletados pelo engenheiro Kayc Wayhs Lopes, graduado da UNESP - Campus de Ilha Solteira, em sua pesquisa de Iniciação Científica financiada pela FAPESP intitulada "Detecção de Falhas Experimentais em Estruturas Mecânicas Utilizando Sistemas Imunológicos Artificiais"(n° 2016/12241-0). O experimento consistia na coleta de sinais de impedância de uma viga de alumínio contendo um transdutor piezoelétrico PSI-5H4E da *Piezo Systems* colado em sua superfície, como demonstrado na Figura 13. Para tal, a técnica computacional empregada para o diagnóstico da estrutura foi o Algoritmo de Seleção Negativa (ANS, do inglês *Negative Selection Algorithm*), o qual pertence a uma série de técnicas computacionais dos Sistemas Imunológicos Artificiais.

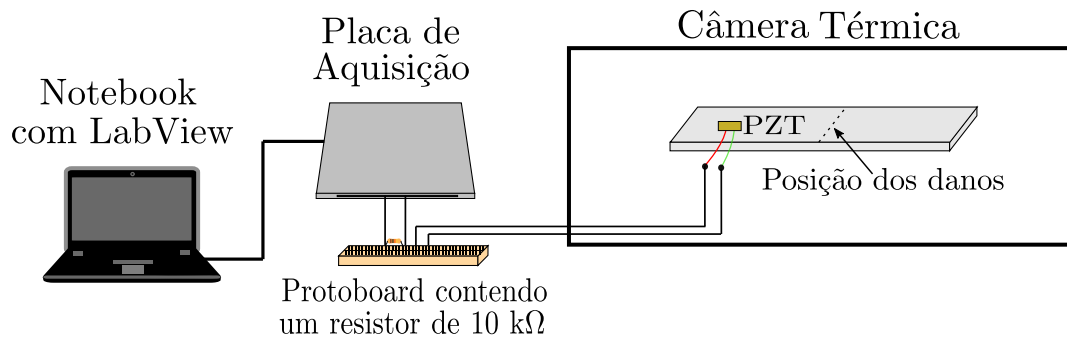
Figura 13: Viga com PZT acoplado em sua superfície.



Fonte: Lopes (2018).

A Figura 14 apresenta um esquema do aparato experimental utilizado, sendo que empregou-se uma placa da *National Instruments*, modelo NI-USB 6211 (16 bits); um notebook contendo o software com o analisador de impedância desenvolvido por Baptista & Filho (2009) em um ambiente LabView ®; e um protoboard contendo uma resistência de 10 k Ω , a qual atua como um circuito auxiliar cuja função é limitar a corrente para aquisição dos sinais.

Figura 14: Esquema representativo da montagem experimental empregada.



Fonte: Adaptado de Lopes (2018).

A fim de adquirir os dados para a análise do efeito da temperatura nas curvas de impedância, realizou-se o experimento utilizando uma viga de alumínio na condição livre-livre, a qual foi inserida dentro de uma câmera térmica modelo *Thermotron's S-Series*, responsável pela variação da temperatura, conforme exposto na Figura 15. As características da viga e do transdutor piezoelétrico nela acoplado estão presentes na Tabela 1.

Figura 15: Viga suspensa por elásticos simulando a condição livre-livre.



Fonte: Lopes (2018).

Tabela 1: Características geométricas da viga e do transdutor piezoelétrico PSI-5H4E.

Propriedades	Viga	PZT
Comprimento (mm)	500	10
Largura (mm)	13	5
Espessura (mm)	3	0,7

Fonte: Lopes (2018).

Obteve-se os sinais para uma faixa de temperatura de -10°C a 80°C , a qual seria capaz de abranger uma grande parcela das estruturas em atividade, considerando um intervalo de 2°C na situação sem dano (*baseline*). Para excitar a estrutura utilizou-se

uma varredura senoidal em frequência com uma amplitude de ± 5 V em uma faixa de frequência de 0 a 125 kHz.

De acordo com Bitencourt & Júnior (2010), considera-se dano qualquer modificação intencional ou não intencional das propriedades físicas e/ou geométricas do sistema estrutural podendo comprometer seu funcionamento, o qual, apesar de ainda poder operar, não estará em perfeitas condições. Geralmente, o dano é responsável por provocar a falha, a qual é retratada como alterações na estrutura que inviabilizam que a mesma realize suas funções de forma satisfatória. O dano pode se manifestar de diversas formas, como por meio de trincas, deformações, corrosão, entre outros exemplos. A fim de estudar a ocorrência de danos, foram simulados dois tipos de danos, os quais foram posicionados a 20 cm do PZT: acréscimo de uma massa de durepoxi de 4,89 gramas (falha 1) e um corte de aproximadamente 4 mm (falha 2), cujas imagens estão expostas na Figura 16. Para as condições de dano, os sinais foram coletados na mesma faixa de frequência (0 a 125 kHz) e temperatura (-10°C a 80°C) que os sinais coletados na condição *baseline*, porém com um passo de 5°C .

Figura 16: Imagens contendo os danos simulados.



Fonte: Lopes (2018).

Para minimizar os efeitos da histerese, os sinais foram coletados na situação de aquecimento e resfriamento para as três condições analisadas (sem dano, falha 1 e 2). Não obstante, neste trabalho utiliza-se o valor médio dos sinais aferidos no aquecimento e resfriamento em todas as técnicas de compensação de temperatura.

A Tabela 2 apresenta o total de sinais coletados para as três situações em análise: *baseline*, falha 1 e 2.

Tabela 2: Sinais coletados.

Número de sinais	Condição Estrutural
92	<i>Baseline</i>
38	Falha 1
38	Falha 2

Fonte: Lopes (2018).

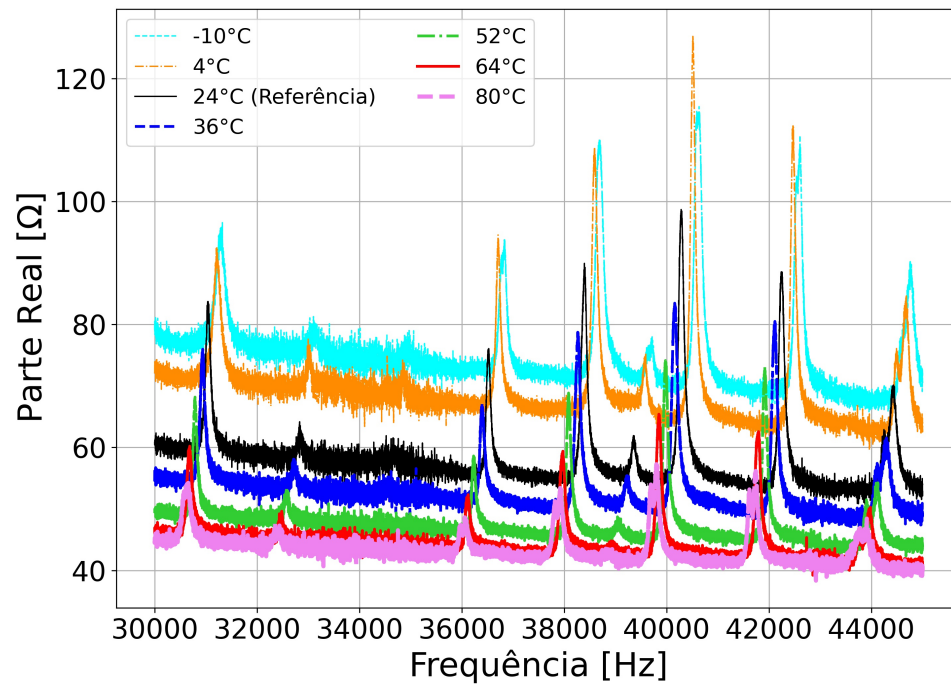
3.2 Seleção dos Dados

A fim de analisar os sinais da impedância eletromecânica aferidos foi necessário, primeiramente, determinar o intervalo de frequência, assim como as temperaturas que seriam observadas. No caso do sinal sem dano, utilizou as temperaturas: -10°C, 4°C, 24°C, 36°C, 52°C, 64°C e 80°C, sendo a assinatura de impedância a 24°C utilizada como impedância de referência, i. e, ao implementar as técnicas de compensação, as curvas serão corrigidas com relação a este sinal. Para os sinais contendo danos, as temperaturas abordadas foram 5°C, 25°C, 35°C, 50°C, 65°C e 80°C. As faixas de frequências analisadas foram de 30 kHz a 45 kHz (15 kHz) para as técnicas do Park et al. (1999), Koo et al. (2009), Baptista et al. (2014) e de 1 kHz a 20 kHz para a técnica de Grisso & Inman (2010).

Nas Figuras 17 a 19, tem-se as curvas relacionadas com a parte real da impedância eletromecânica dos sinais sem e com dano para a banda de frequência e temperatura selecionadas. Além disso, em todos os casos, também foi plotado o *baseline* a fim de realizar uma comparação visual entre o valor de referência e aqueles medidos. Nota-se que todos os sinais coletados apresentam um alto nível de ruído, os quais podem dificultar a análise dos resultados e talvez se exija o processamento dos mesmos.

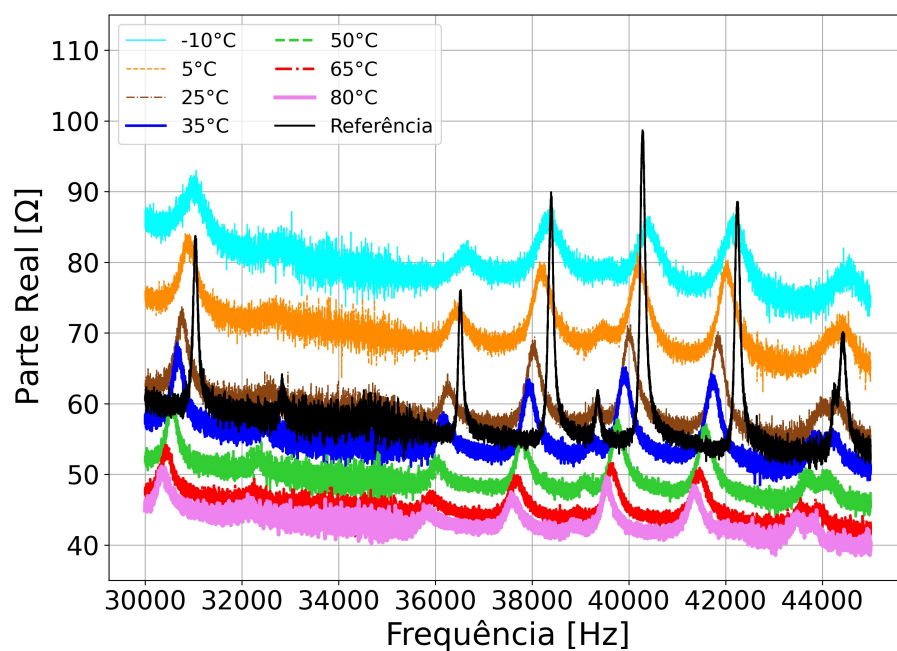
Em todo o trabalho, exceto para a técnica de Grisso & Inman (2010), analisa-se a parte real da impedância eletromecânica, visto que esta é mais sensível à detecção de danos ou de qualquer tipo de alterações nas características físico-geométricas do sistema mecânico, de acordo com diversos pesquisadores, como Park et al. (1999), Baptista & Filho (2009) e Baptista & Vieira Filho (2010). Além disso, utilizou-se os dados correspondentes a média entre os valores coletados durante o aquecimento e resfriamento para plotar as curvas de impedância eletromecânica ao longo de todo a pesquisa.

Figura 17: Parte real da impedância eletromecânica referente ao sinal sem dano.



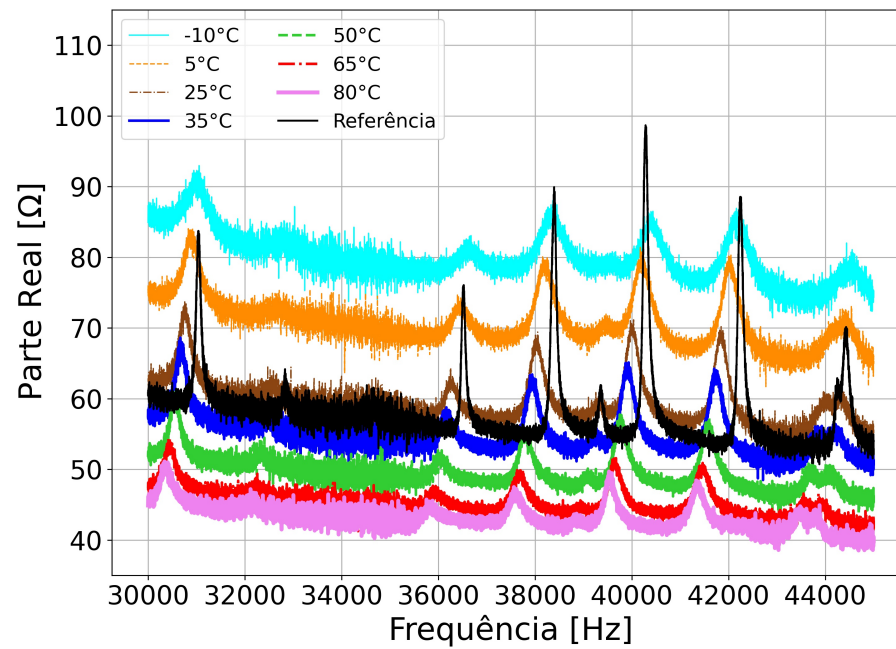
Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Figura 18: Parte real da impedância eletromecânica referente ao sinal com falha 1.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Figura 19: Parte real da impedância eletromecânica referente ao sinal com falha 2.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

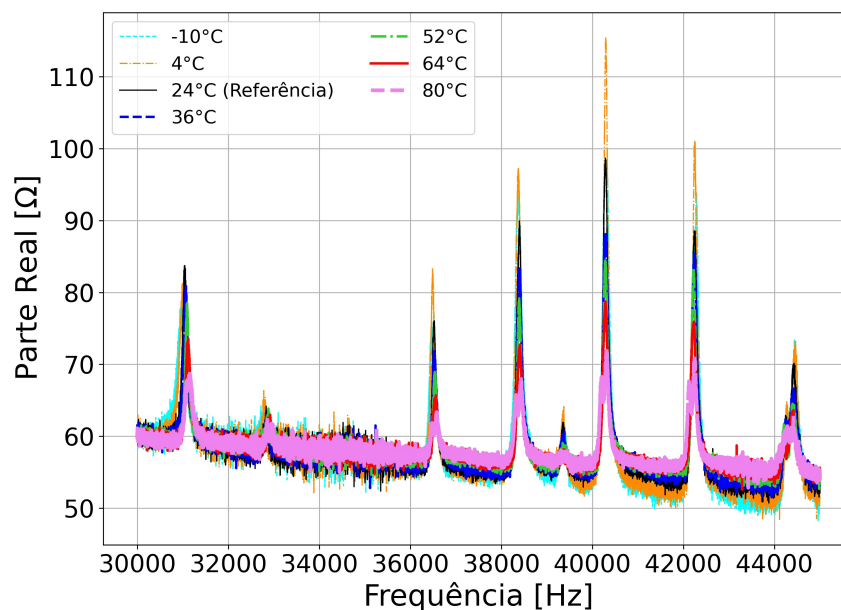
4 Resultados e Discussões

Inicialmente implementou-se a técnica de Park et al. (1999), Seção 4.1. A seguir, são apresentados os resultados mediante o uso da técnica de Koo et al. (2009), Seção 4.2. Na sequência, aplicou-se a técnica de Baptista et al. (2014) para a compensação do eixo horizontal (frequência), Seção 4.3. Na Seção 4.4 realiza-se comparação entre as três técnicas de compensação, assim como é apresentado os gráficos contendo os valores de RMSD e CCDM calculados para as três técnicas citadas anteriormente utilizando as Eqs. (16) e (17), respectivamente. A Seção 4.5 analisa a tendência dos índices métricos (RMSD e CCDM) obtidos após a efetuar a compensação das curvas de impedância eletromecânica para cada técnica. Por fim, a técnica de Grisso & Inman (2010) é apresentada na Seção 4.6. Todos os resultados apresentados a seguir foram obtidos mediante o uso do algoritmo implementado no *software* livre Python ®.

4.1 Análise da técnica de Park et al. (1999)

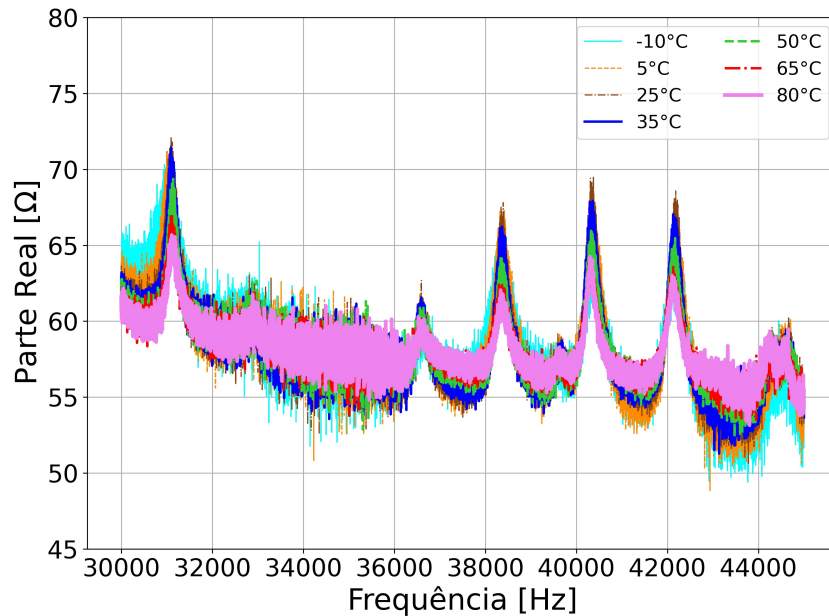
Adotando-se a teoria apresentada na Seção 2.2.1, obteve-se as curvas da parte real da impedância eletromecânica expostas nas Figuras 20 a 22, para as três condições: sem dano, com falha 1 (acréscimo de massa) e falha 2 (corte).

Figura 20: Parte real da impedância eletromecânica referente ao sinal sem dano após a implementação da técnica de compensação de Park et al. (1999).



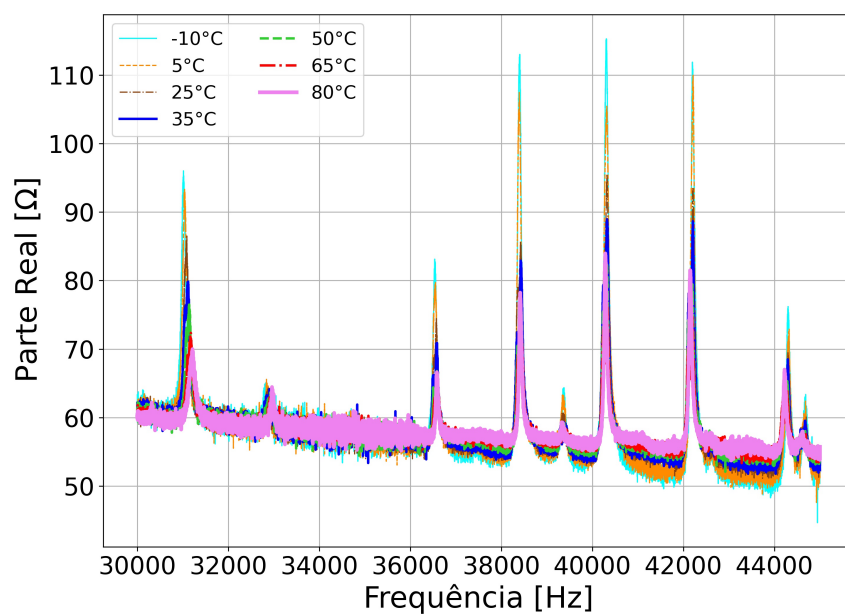
Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Figura 21: Parte real da impedância eletromecânica referente ao sinal com falha 1 após a implementação da técnica de compensação de Park et al. (1999).



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Figura 22: Parte real da impedância eletromecânica referente ao sinal com falha 2 após a implementação da técnica de compensação de Park et al. (1999).



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

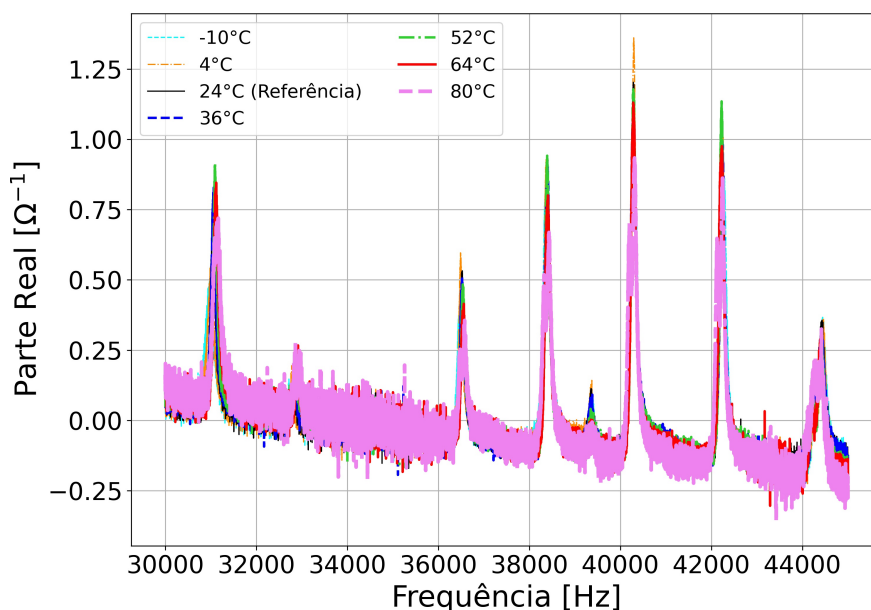
Mediante o uso da técnica de compensação de Park et al. (1999), foi possível observar a “correção” de ambos os eixos (frequência e amplitude), assim como foi observado pelos autores, Figura 7. As curvas ficaram praticamente sobrepostas, demonstrando a eficácia da técnica para amenizar os efeitos da temperatura.

A técnica de compensação do Park et al. (1999) é capaz de realizar a compensação de ambos os eixos em apenas uma operação, ao contrário da técnica de Koo et al. (2009), gerando rotinas mais rápidas e com um menor custo computacional. Além disso, como demonstrando pelos autores, esta técnica é eficaz mesmo quando aplicada em estruturas complexas. Além disso, a técnica foi capaz de apresentar uma boa eficácia mesmo com os sinais utilizados apresentando ruídos. Porém, observando principalmente a Figura 21, nota-se uma intensificação desse ruídos após a implementação da técnica, o que deterioraria a qualidade do sinal.

4.2 Análise da técnica de Koo et al. (2009)

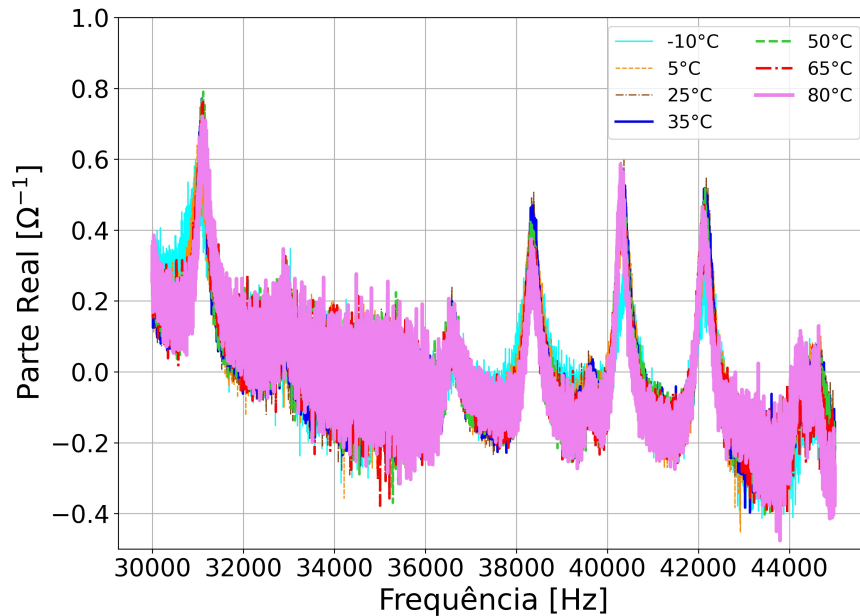
Seguindo os preceitos apresentados na Seção 2.2.2 foi possível obter as curvas expostas nas Figuras 23 a 25 em que é exibido a parte real da impedância eletromecânica normalizada após a utilização da técnica de compensação do Koo et al. (2009) nas três condições em estudo: sem dano, com falha 1 e falha 2.

Figura 23: Parte real da impedância eletromecânica normalizada referente ao sinal sem dano após a implementação da técnica de compensação de Koo et al. (2009).



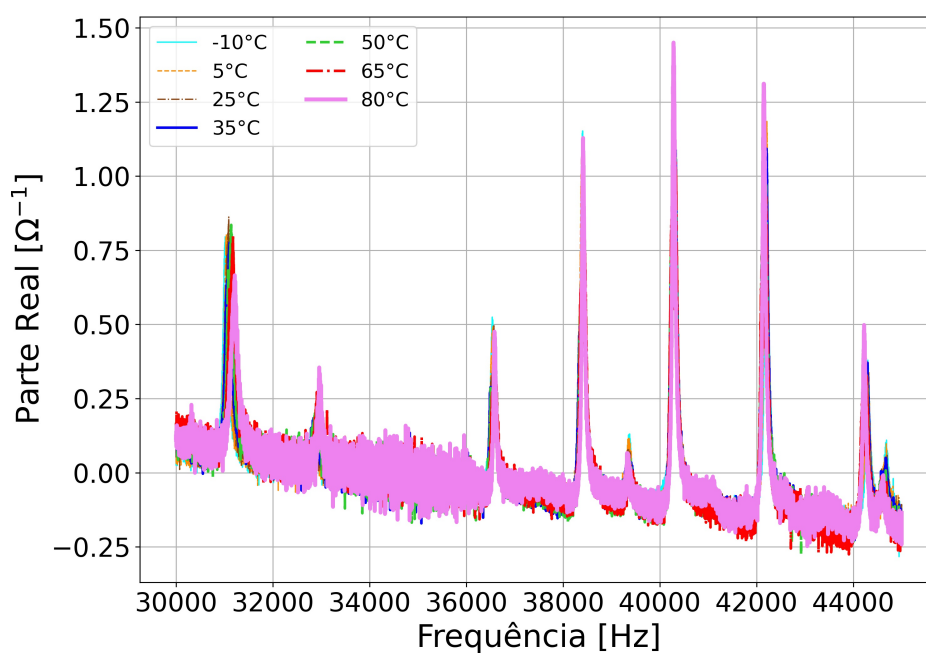
Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Figura 24: Parte real da impedância eletromecânica normalizada referente ao sinal com falha 1 após a implementação da técnica de compensação de Koo et al. (2009).



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Figura 25: Parte real da impedância eletromecânica normalizada referente ao sinal com falha 2 após a implementação da técnica de compensação de Koo et al. (2009).



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Nota-se que, assim como demonstrado na Figura 9-(b), após a implementação dessa técnica de compensação as curvas são deslocadas para o limiar zero do eixo vertical. Apesar disso, elas mantêm a mesma tendência e comportamento da curva em comparação com os sinais originais das Figuras 17 a 19, exceto para a amplitude dos picos, a qual parece se alterar. Isso ocorre devido a normalização das curvas de impedância, acarretando que todos os sinais estejam na mesma escala. Além disso, ambos os eixos (amplitude e frequência), assim como a suavização dos picos foram “corrigidos”, sendo que todas as curvas ficaram praticamente sobrepostas.

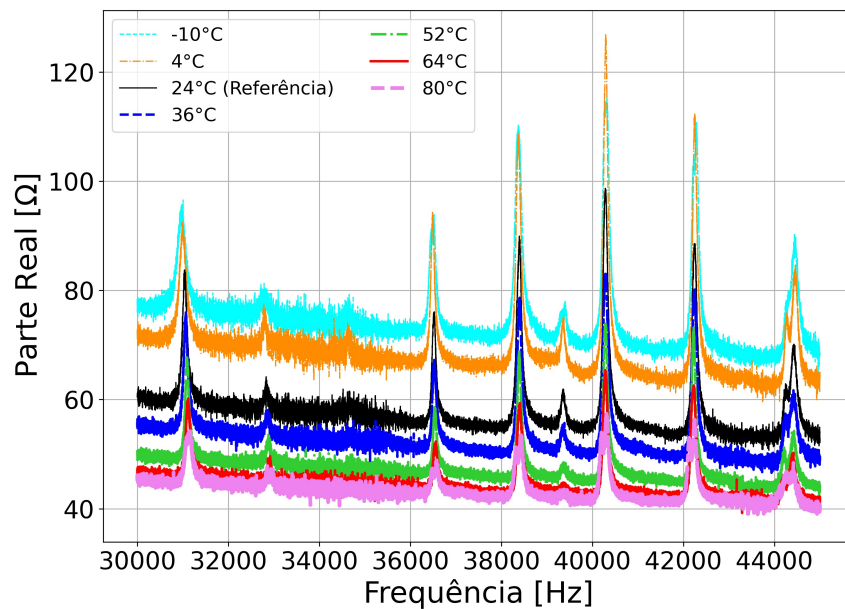
A principal desvantagem da técnica de Koo et al. (2009) é o fato de precisar realizar duas operações para a compensação completa (em ambos os eixos) das curvas de impedância, exigindo mais espaço de memória computacional. As amplitudes dos picos e vales das curvas de impedância foram alterados após a implementação desta técnica, apresentando valores similares entre si, independente da temperatura, devido a sua normalização. Entretanto, a correspondência entre os sinais após a sua implementação aparenta ser maior do que para as demais técnicas de compensação estudadas neste trabalho.

4.3 Análise da técnica de Baptista et al. (2014)

Mediante o uso da teoria apresentada na Seção 2.2.3, obteve-se as curvas da parte real da impedância eletromecânica expostas nas Figuras 26 a 28, as quais contêm as curvas compensadas para as condições: sem dano, com falha 1 e falha 2.

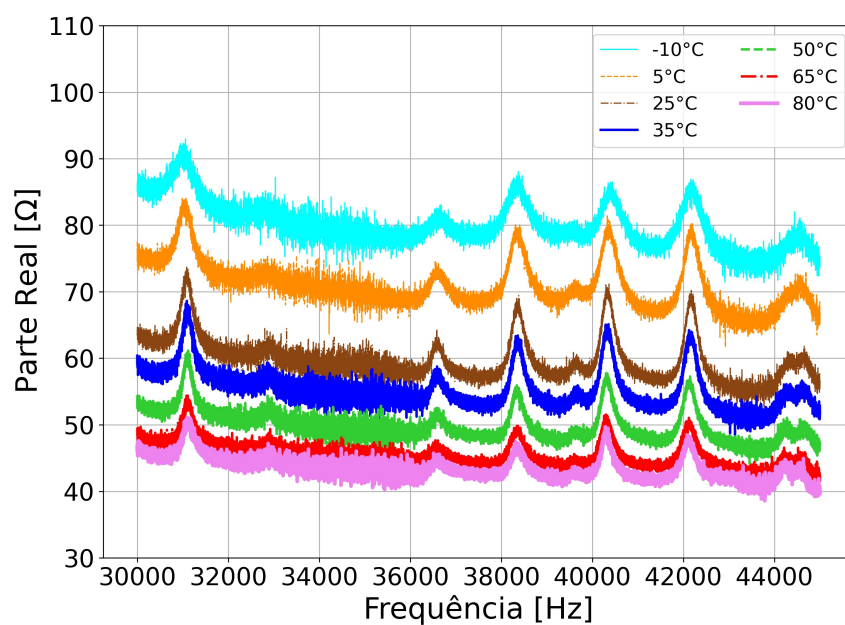
Ao observar a Figura 18 percebe-se que os picos do sinal com falha estão à esquerda daqueles relacionados ao de referência, exceto para a temperatura de -10°C a qual apresenta um comportamento misto: alguns picos frequências naturais estão à direita (segundo, quarto e sexto pico) e outros estão posicionadas à esquerda (primeiro, terceiro e quinto pico). Portanto, implementou-se ambas as Eqs. (11) e (12) a fim de descobrir qual obteria um maior C_C , que foi obtido pelo uso da Eq. (11). Por conseguinte, para os sinais na condição de falha 1, empregou-se apenas a Eq. (11), independente da temperatura ser maior ou menor que a do *baseline* na temperatura de referência (24°C).

Figura 26: Parte real da impedância eletromecânica referente ao sinal sem dano após a implementação da técnica de compensação de Baptista et al. (2014).



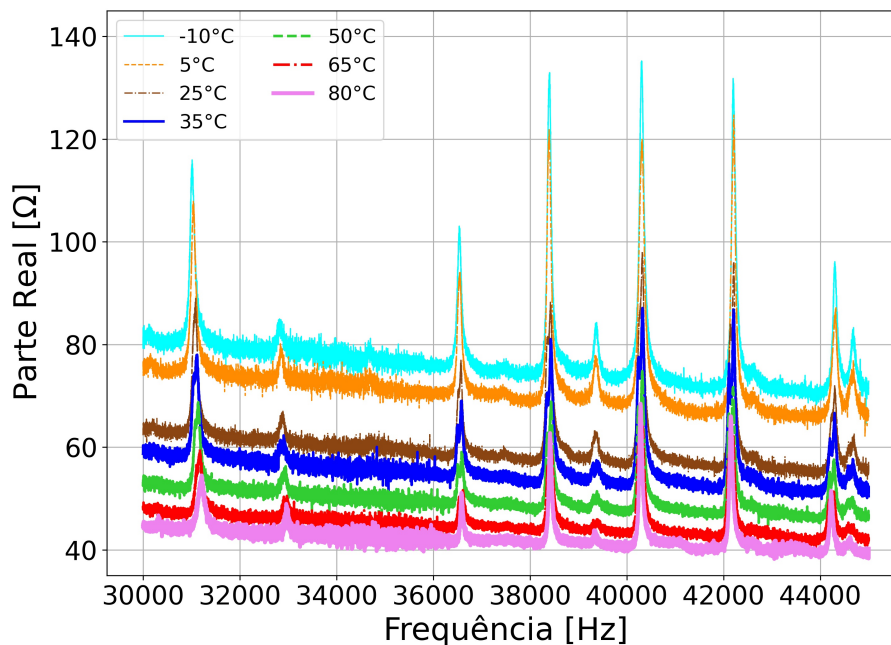
Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Figura 27: Parte real da impedância eletromecânica referente ao sinal com falha 1 após a implementação da técnica de compensação de Baptista et al. (2014).



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Figura 28: Parte real da impedância eletromecânica referente ao sinal com falha 2 após a implementação da técnica de compensação de Baptista et al. (2014).



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Analizando as Figuras 26 a 28, percebe-se que os picos dos sinais ficaram bem alinhados para todos os casos, demonstrando a eficiência da técnica de Baptista et al. (2014) para a minimização dos efeitos da temperatura do eixo horizontal da impedância eletromecânica.

A técnica de compensação do Baptista et al. (2014) emprega apenas a primeira parte da técnica de Koo et al. (2009), i.e., atua apenas na compensação da frequência (eixo horizontal). Portanto, a mesma não é eficaz ao realizar um monitoramento qualitativo da integridade da estrutura, pois as curvas continuam bem discrepantes, mesmo que esse efeito não seja provocado por danos. Entretanto, para uma análise quantitativa envolvendo o CCDM, esta técnica apresenta os mesmos resultados da técnica de compensação do Koo et al. (2009) sem gerar um maior custo computacional, como foi observado nas Figuras 23 a 25 da Seção 4.2.

4.4 Comparação das técnicas do Park et al. (1999), Koo et al. (2009) e Baptista et al. (2014)

Nas Figuras 29 a 34 são apresentados os valores dos índices RMSD e CCDM para cada condição (sem dano, com dano tipo 1 e tipo 2), respectivamente, para todas as

temperaturas estudadas.

Ao analisar os gráficos das Figuras 29, 31 e 33, relacionados ao cálculo do RMSD, nota-se que os valores obtidos para a técnica de Baptista et al. (2014) são similares aos RMSDs para os sinais não compensados, ou seja, a técnica de Baptista et al. (2014) não realiza uma redução significativa nesta métrica de dano. Isso ocorre pois o RMSD é mais sensível às variações em amplitude, a qual não ocorreu com a implementação dessa estratégia de compensação. Os valores de RMSD calculados para a técnica de Koo et al. (2009) foram muito superiores aos dos sinais não compensados, em virtude do deslocamento das curvas de impedância para o limiar zero do eixo vertical. Essa ação acarretou em números próximos a zero como denominador da Eq. (16), tendendo o resultado a um alto valor. Portanto, conclui-se que para realizar uma análise quantitativa do Monitoramento da Integridade Estrutural empregando o índice RMSD, a técnica de Park et al. (1999) é a mais adequada. Esta foi responsável por reduzir o RMSD em 81% a 90% para a condição sem dano, 46% a 88% para a condição com falha 1 e 62% a 90% para a condição com falha 2.

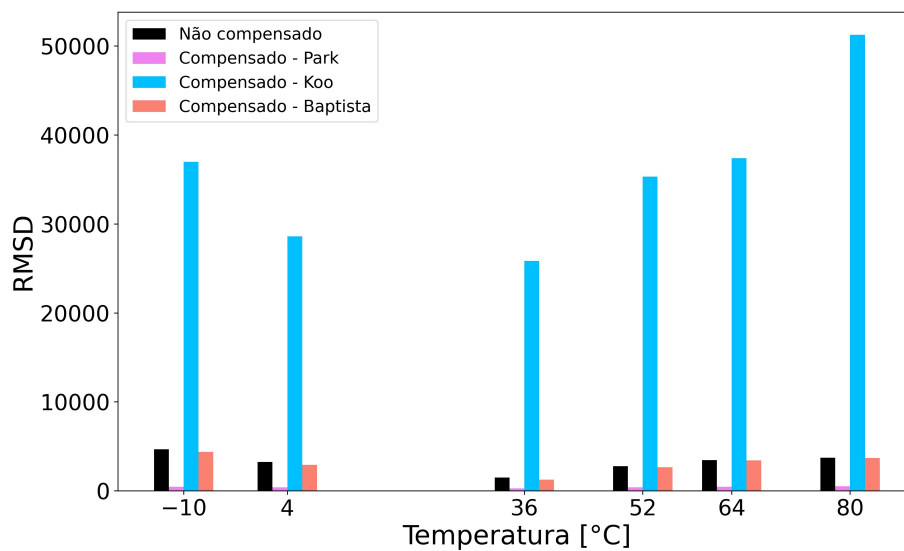
Para as Figuras 30, 32 e 34, relacionadas ao cálculo do CCDM, obteve-se praticamente os mesmos valores após a implementação das três técnicas. Logo, mesmo a técnica de Koo et al. (2009) realizando a compensação do eixo vertical, os valores de CCMDs por ela obtidos são iguais a da técnica de Baptista et al. (2014), o qual utiliza apenas a teoria envolvendo o coeficiente de correlação cruzada para a implementação da compensação das curvas de impedância. Essa igualdade entre valores de CCMDs após a implementação das três técnicas atesta a teoria referente a maior sensibilidade deste índice às alterações em frequência. Os valores de CCMDs reduziram em 84% a 95% para o sinal na condição sem dano, 34% a 66% na condição com falha 1 (excluiu-se os resultados da temperatura de -10 °C) e 19% a 83% na condição de falha 2.

Observa-se que todas as temperaturas analisadas nas três condições apresentaram uma queda significativa do CCDM, exceto no caso da temperatura de -10 °C para a falha 1, a qual provavelmente ocorreu devido a instabilidade do posicionamento dos picos com relação aos do *baseline* na temperatura de referência de 24 °C. Assim como a temperatura de 5 °C na condição de falha 2, a qual, apesar de reduzir os valores, não apresentou uma queda tão drástica. Isso também ocorre devido ao posicionamento dos picos, no qual os dois últimos estão à esquerda do sinal de referência, enquanto os demais estão à direita, como pode ser observado na Figura 19. Logo, o cálculo do CCDM é diretamente afetado pelo posicionamento dos picos do sinal desconhecido em relação ao de referência, sendo que um posicionamento misto (simultaneamente, à esquerda e à direita da curva de referência) pode diminuir a eficiência de uma análise de monitoramento da integridade estrutural envolvendo o cálculo do índice CCDM.

As três estratégias de compensação analisadas exigiram altos números de iterações

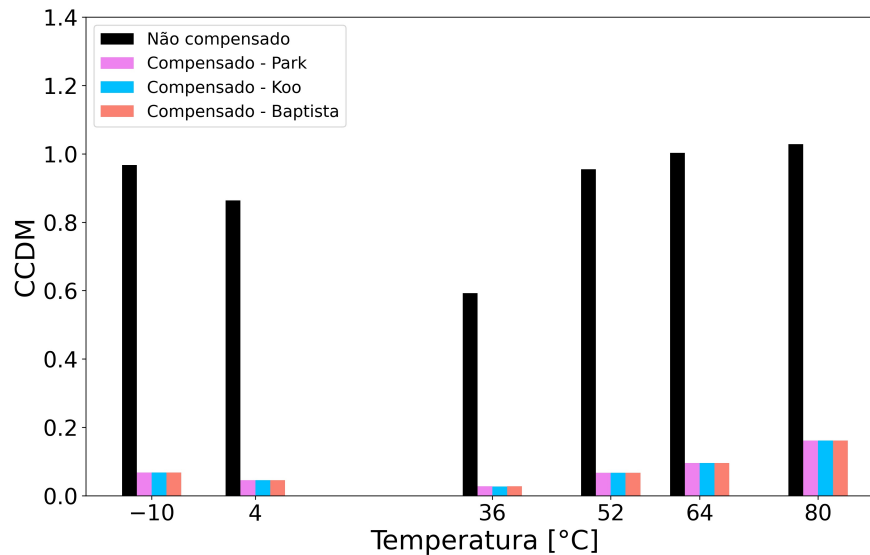
e, conseqüentemente, um alto custo operacional e tempo de execução (em torno de 15 min para a compensação horizontal de cada curva separada e aproximadamente 1h30min para as 6 curvas analisadas ao utilizar um notebook com um processador Intel(R) Core(TM) i5-7200U CPU @ 2.50GHz 2.71 GHz, uma RAM de 8 GB e um sistema operacional de 64 bits) para efetuar o deslocamento das curvas. Apesar disso, as três técnicas empregadas por Park et al. (1999), Koo et al. (2009) e Baptista et al. (2014) foram eficazes na compensação de temperatura para as três condições em análise: sem dano, com um dano caracterizado pelo acréscimo de massa e outro por um corte na estrutura.

Figura 29: Desvio médio quadrático (RMSD) para os sinais na condição sem dano considerando as 3 técnicas de compensação: Park et al. (1999), Koo et al. (2009) e Baptista et al. (2014).



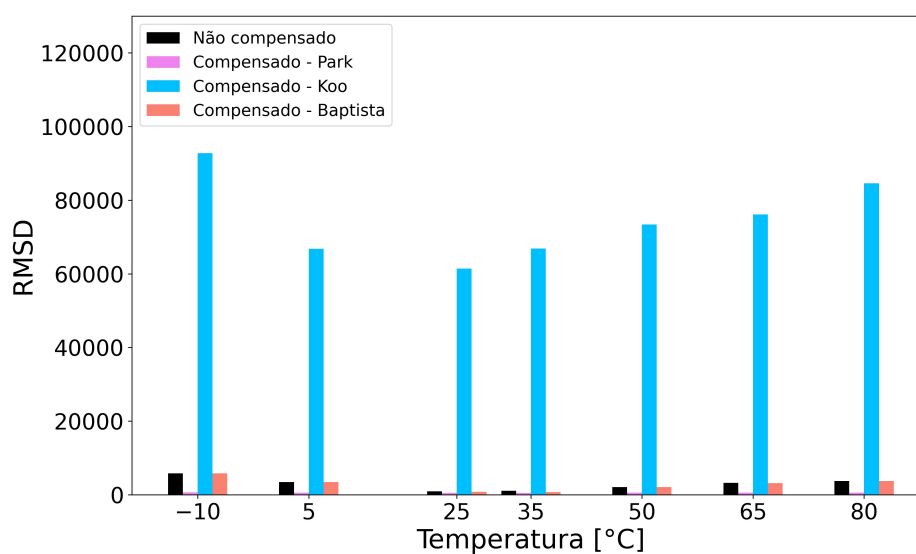
Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Figura 30: Métrica do desvio do coeficiente de correlação (CCDM) para os sinais na condição sem dano considerando as 3 técnicas de compensação: Park et al. (1999), Koo et al. (2009) e Baptista et al. (2014).



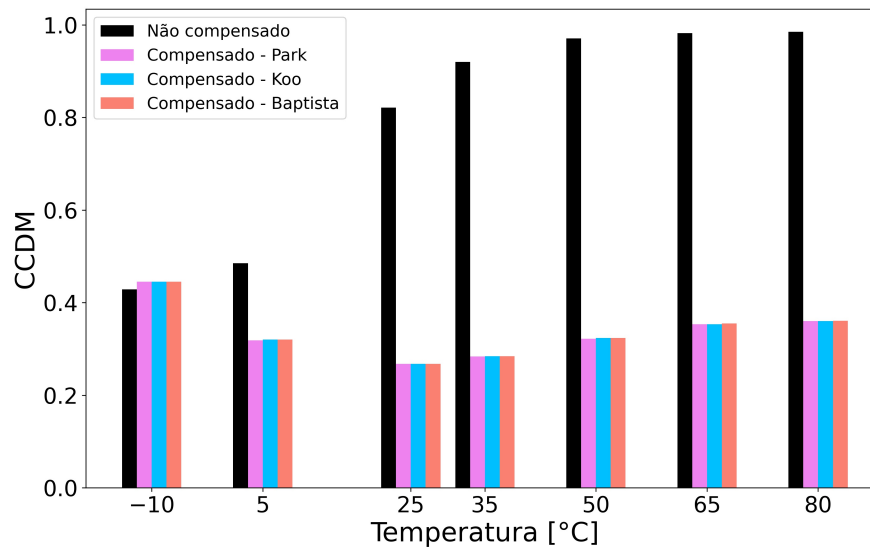
Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Figura 31: Desvio médio quadrático (RMSD) para a condição com falha 1 considerando as 3 técnicas de compensação: Park et al. (1999), Koo et al. (2009) e Baptista et al. (2014).



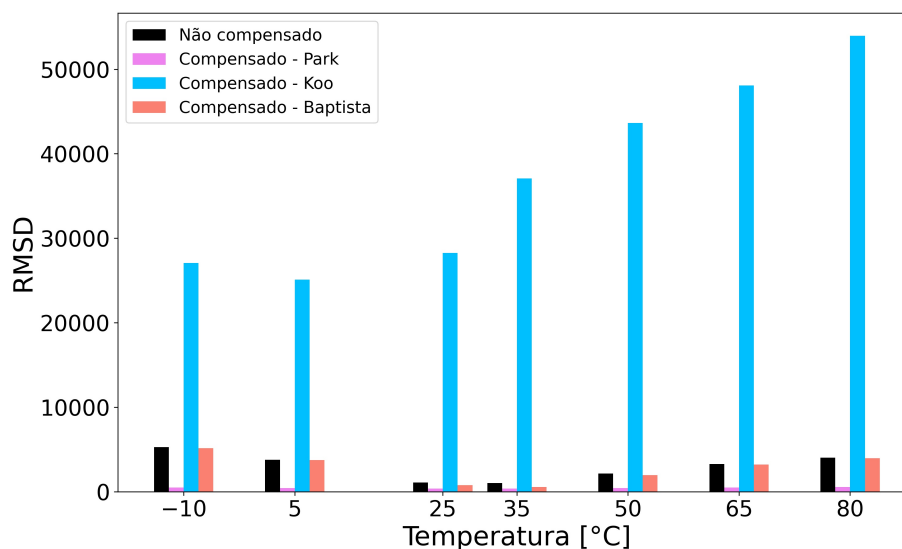
Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Figura 32: Métrica do desvio do coeficiente de correlação (CCDM) para a condição com falha 1 considerando as 3 técnicas de compensação: Park et al. (1999), Koo et al. (2009) e Baptista et al. (2014).



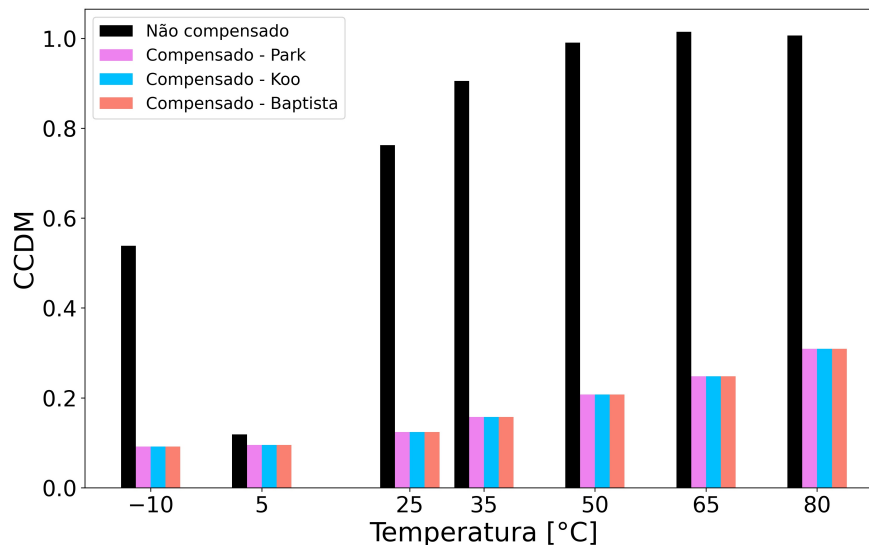
Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Figura 33: Desvio médio quadrático (RMSD) para a condição com falha 2 considerando as 3 técnicas de compensação: Park et al. (1999), Koo et al. (2009) e Baptista et al. (2014).



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Figura 34: Métrica do desvio do coeficiente de correlação (CCDM) para a condição com falha 2 considerando as 3 técnicas de compensação: Park et al. (1999), Koo et al. (2009) e Baptista et al. (2014).



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

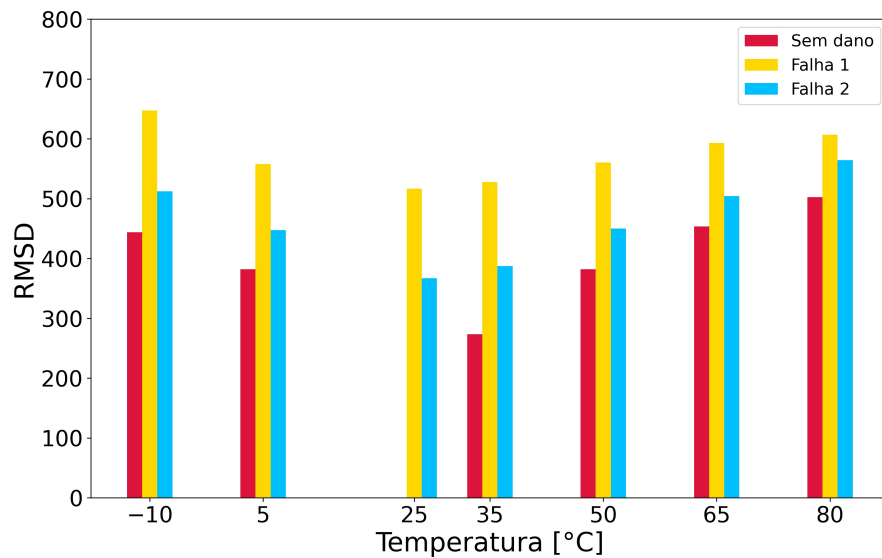
4.5 Tendência dos índices métricos após a compensação dos sinais de impedância eletromecânica

4.5.1 Técnica de Park et al. (1999)

As Figuras 35 e 36 apresentam os valores previamente calculados de RMSD e CCDM para os sinais na condição sem dano, com falha 1 e 2 após a aplicação da técnica de Park et al. (1999).

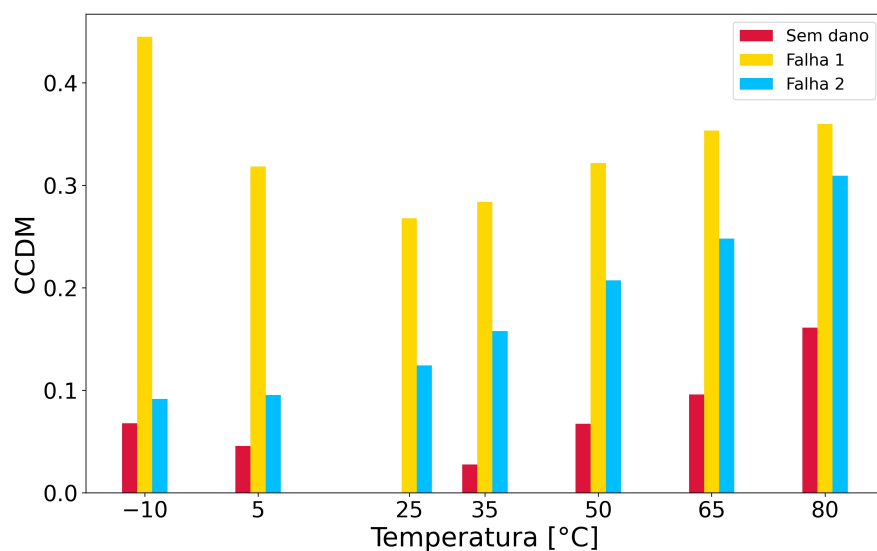
Os valores de RMSD e CCDM obtidos para a condição com falha 1 e 2 mantiveram-se acima dos valores calculados para a condição sem dano, demonstrando que mesmo após a implementação da técnica de Park et al. (1999), os índices quantitativos detectam a presença do dano. Além disso, em todos os índices e temperaturas analisados, os valores obtidos para o sinal com falha 1 foram superiores ao sinal com falha 2, visto realiza uma maior alteração estrutural.

Figura 35: Valores de RMSD para os sinais compensados pela técnica de Park et al. (1999).



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Figura 36: Valores de CCDM para os sinais compensados pela técnica de Park et al. (1999).



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

4.5.2 Técnica de Koo et al. (2009)

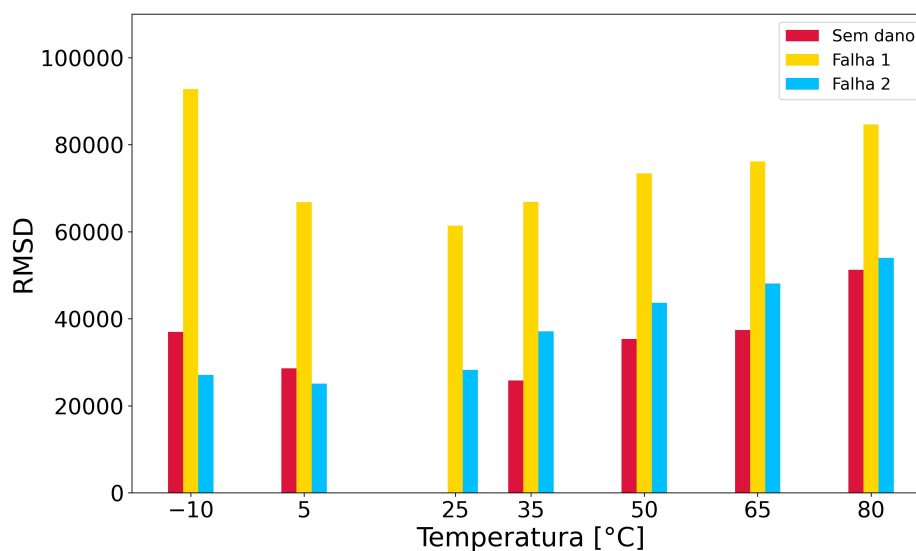
As Figuras 37 e 38 apresentam os valores previamente calculados de RMSD e

CCDM para os sinais na condição sem dano, com falha 1 e 2 após a aplicação da técnica de Koo et al. (2009).

Analisando apenas a Figura 37, a qual contém os valores de RMSD, tem-se que a falha 1 foi detectada (maiores índices métricos do que aqueles obtidos para a condição sem dano) em todas as temperatura. Enquanto que para a temperatura de -10°C e 5°C, a falha 2 não foi detectada.

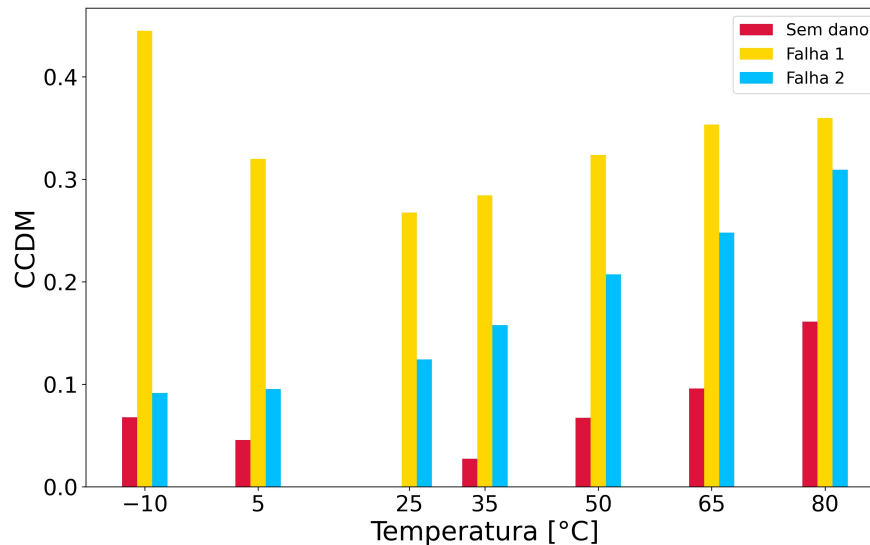
Na Figura 37, os valores de CCDM obtidos para a condição com falha 1 e 2 mantiveram-se acima dos valores calculados para a condição sem dano para todas as temperaturas, demonstrando que mesmo após a implementação da técnica de Park et al. (1999), o índice métrico CCDM detecta a presença do dano.

Figura 37: Valores de RMSD para os sinais compensados pela técnica de Koo et al. (2009).



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Figura 38: Valores de CCDM para os sinais compensados pela técnica de Koo et al. (2009).



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

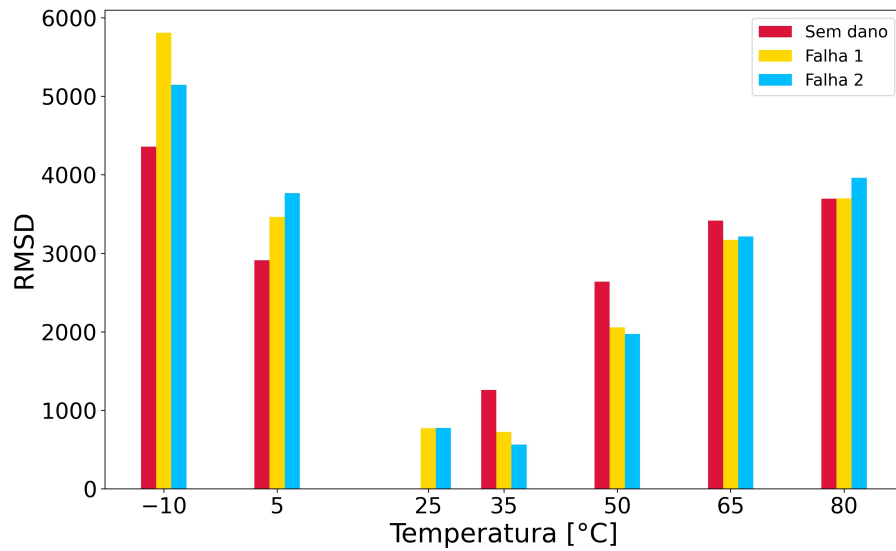
4.5.3 Técnica de Baptista et al. (2014)

As Figuras 39 e 40 apresentam os valores previamente calculados de RMSD e CCDM para os sinais na condição sem dano, com falha 1 e 2 após a aplicação da técnica de Baptista et al. (2014).

Para a Figura 39, a qual contém os valores de RMSD, tem-se que a falha 1 foi detectada apenas para a temperatura de -10°C e 5°C, enquanto que a falha 2 foi detectada na temperatura de -10°C, 5°C e 80°C. Nos demais pontos de temperatura analisados, os valores de RMSD para a condição foram superiores aqueles determinados para a condição com falha.

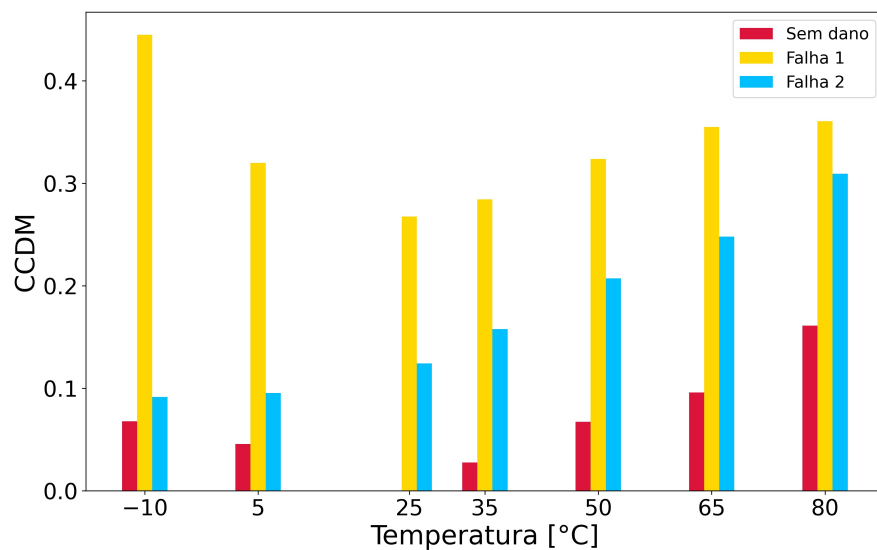
Na Figura 39, os valores de CCDM obtidos para a condição com falha 1 e 2 mantiveram-se acima dos valores calculados para a condição sem dano para todas as temperaturas, demonstrando que mesmo após a implementação da técnica de Baptista et al. (2014), o índice métrico CCDM detecta a presença do dano.

Figura 39: Valores de RMSD para os sinais compensados pela técnica de Baptista et al. (2014).



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Figura 40: Valores de CCDM para os sinais compensados pela técnica de Baptista et al. (2014).

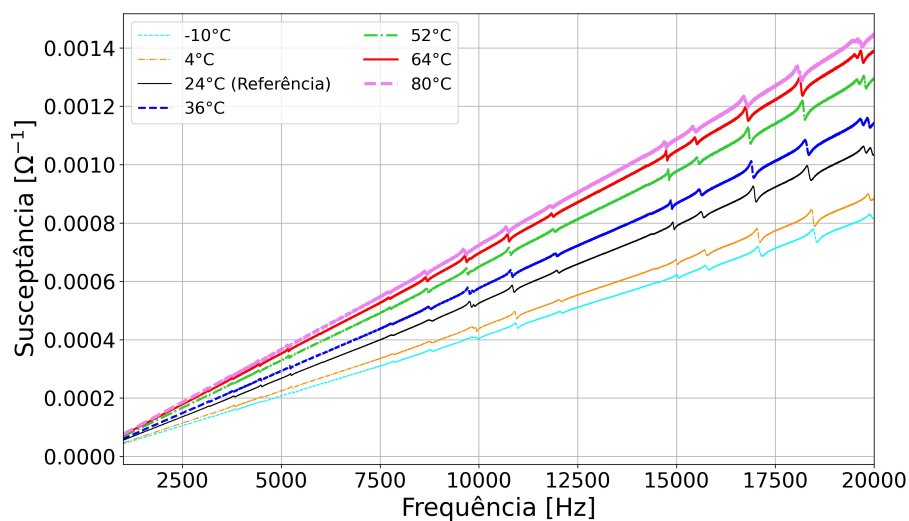


Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

4.6 Análise da técnica de Grisso & Inman (2010)

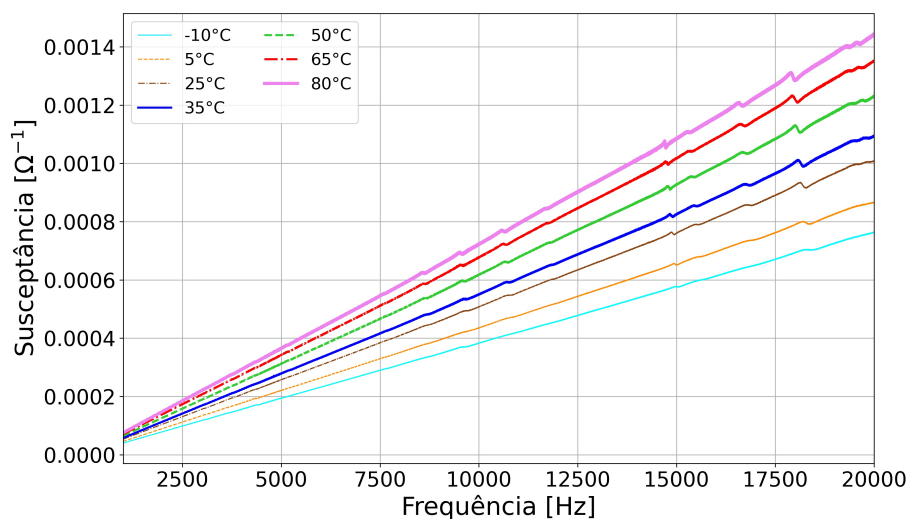
Empregando a teoria apresentada na Seção 2.2.4, obtêm-se as curvas da susceptância $\times$ frequência para os dados adquiridos na condição sem dano, com falha 1 e 2, exibidos nas Figuras 41 a 43, respectivamente.

Figura 41: Curvas da susceptância em função da temperatura para o sinal na condição sem dano.



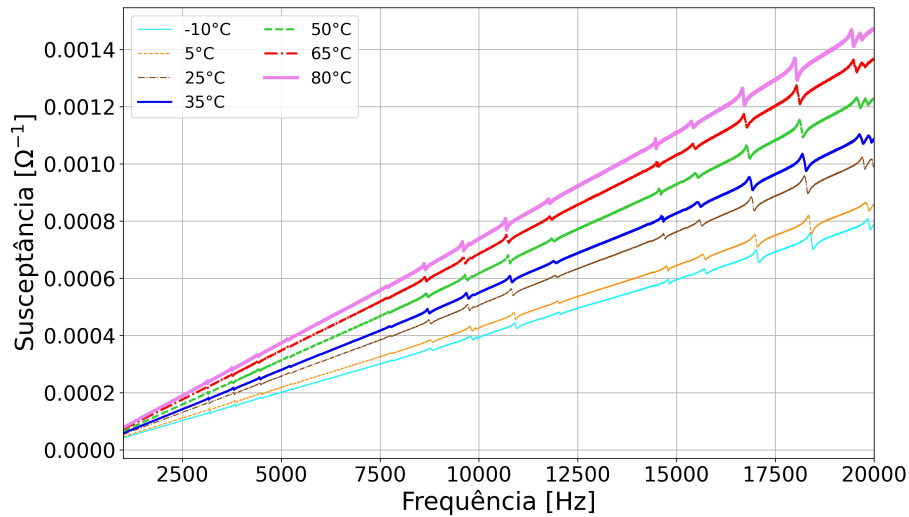
Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Figura 42: Curvas da susceptância em função da temperatura para o sinal com falha tipo 1.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

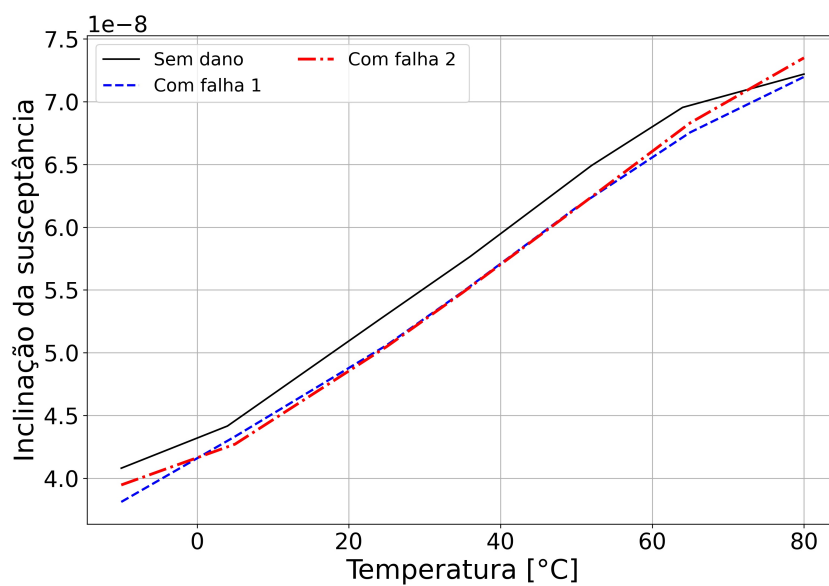
Figura 43: Curvas da susceptância em função da temperatura para o sinal com falha tipo 2.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

A seguir, determina-se a equação da reta e, consequentemente, a inclinação m para as curvas em cada uma das temperaturas apresentadas nas Figuras 41 a 43. Com isso, obteve-se a Figura 44, a qual apresenta as curvas da inclinação da susceptância dos sinais para as três condições em análise.

Figura 44: Inclinação das curvas de susceptância apresentadas nas Figuras 41 a 43.



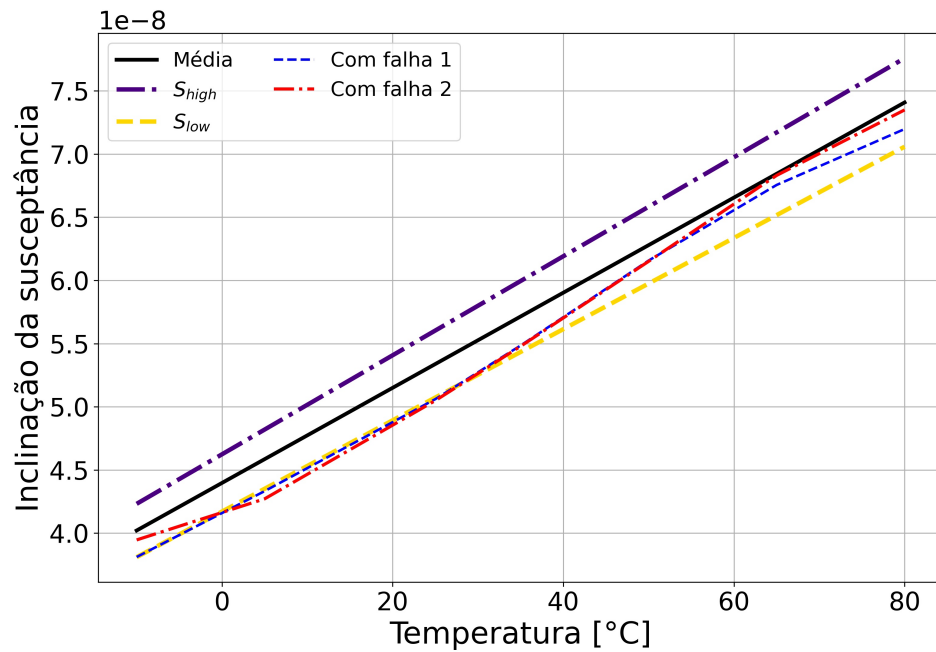
Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Observa-se que, no geral, as curvas na condição com dano ficaram inferiores à da condição sem dano. Porém, muito próximas entre si. Esse resultado pode impossibilitar a implementação da técnica de Grisso & Inman (2010), visto que a probabilidade das curvas da inclinação da susceptância para a situação de falha 1 e 2 ficarem dentro dos limites S_{high} e S_{low} é alta.

Os desvios padrões foram calculados a partir das duas curvas de aquecimento e resfriamento, assim como os demais dados partiram dessa abordagem. Para a análise do intervalo referente a condição sem dano, considerou-se que a variável n da Eq. (15) corresponde a 1, 2 e 3, cujos resultados são apresentados nas Figuras 45 a 47, respectivamente. Sabe-se que n igual a 1, 2 e 3 representa, respectivamente, uma probabilidade de 68%, 95% e 99,7% dos sinais sem dano estarem dentro do intervalo definido pelos limites superiores e inferiores. Na Figura 45 para $n = 1$, alguns valores das curvas obtidas na condição sem dano estavam fora do intervalo analisado. Enquanto que para os demais valores de n , todas as curvas para a situação com dano estavam dentro dos limites superiores e inferiores definidos para a condição sem dano.

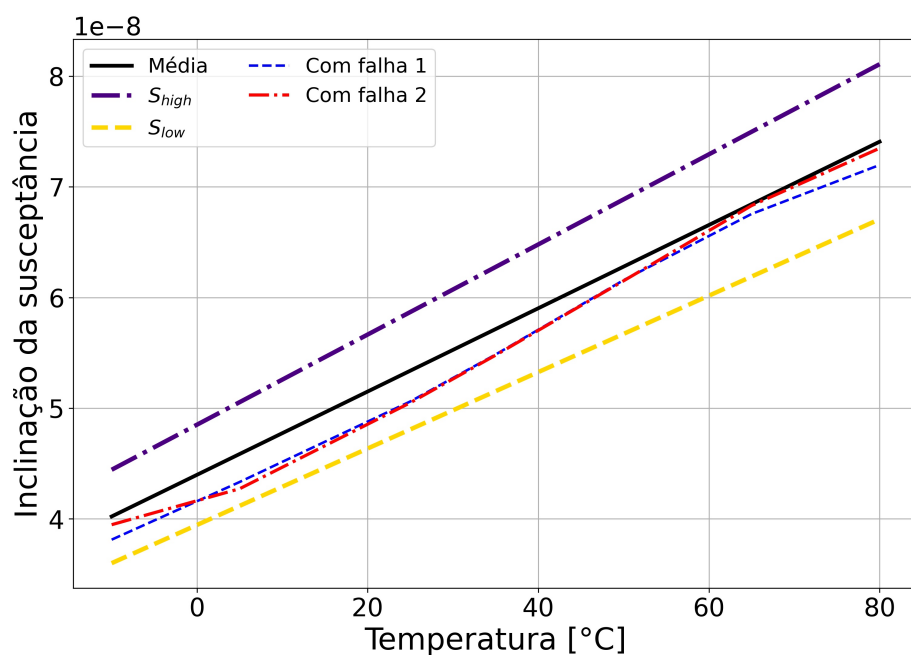
Apesar da relativa simplicidade e facilidade deste método, os resultados apresentados não foram capazes de diferenciar os efeitos da temperatura daqueles provocados pela presença de um dano na estrutura. O comportamento das curvas exibido na Figura 44 pode ser um fator que influenciou esse resultado, visto que essas não possuíam uma tendência linear ao longo de toda a faixa de frequência analisada, como aquela apresentada pelos autores na Figura 12. Além disso, a técnica de Grisso & Inman (2010) foi desenvolvida para o diagnóstico dos sensores piezoelétricos, os quais apresentam uma maior influência na técnica de Impedância Eletromecânica em comparação com a estrutura monitorada (Dias 2020, 2021). Outro fator que pode ter influenciado para a inadequação desta técnica ao modelo proposto é a intensidade dos danos simulados nesta pesquisa e aqueles reproduzidos por Grisso & Inman (2010). O primeiro possui um dano caracterizado pelo acréscimo de uma massa de 5g ou um corte de aproximadamente 4 mm posicionados a uma distância de 20 cm do transdutor piezoelétrico. Enquanto o segundo é caracterizado pela presença de sensores piezoelétricos parcialmente deslocados ou quebrados. Esses fatores (intensidade do dano e maior sensibilidade do PZT) podem ter resultado em uma maior proximidade entre as curvas de inclinação da susceptância para a situação sem e com dano e, conseqüentemente, na inadequação da técnica de Grisso & Inman (2010) ao propósito desta pesquisa: compensação de temperatura para uma estrutura com dano submetida a variações de temperatura.

Figura 45: Representação da média e dos limites superior e inferior do sinal sem dano considerando $n = 1$.



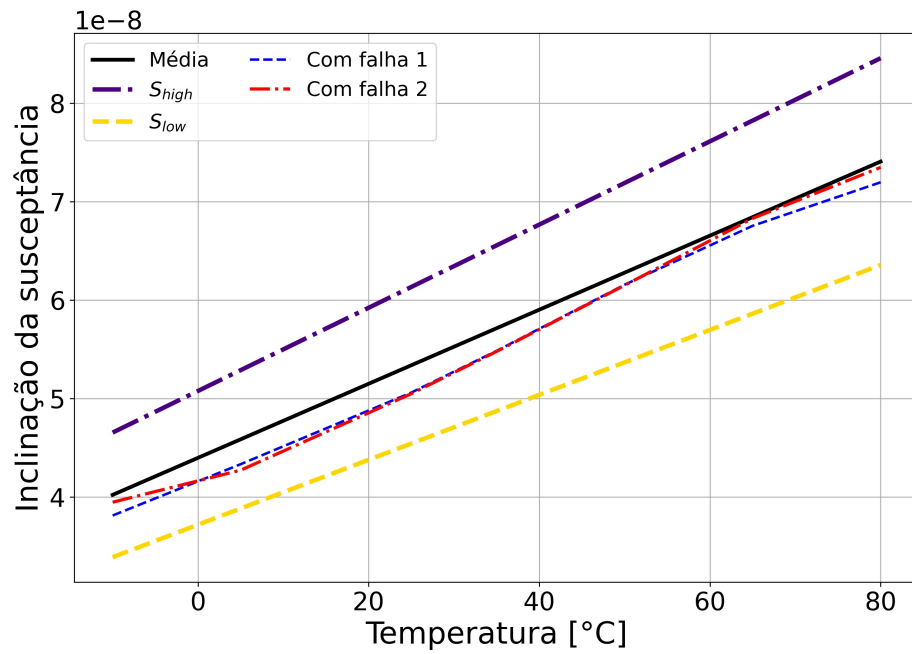
Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Figura 46: Representação da média e dos limites superior e inferior do sinal sem dano considerando $n = 2$.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Figura 47: Representação da média e dos limites superior e inferior do sinal sem dano considerando $n = 3$.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

5 Considerações Finais

5.1 Conclusões

Este trabalho de graduação visou investigar a viabilidade do uso de algumas técnicas de compensação de temperatura nas curvas de impedância eletromecânica de forma a contribuir para a implementação desta técnica de monitoramento em sistemas reais. A compensação dos efeitos de temperatura são avaliados em uma viga de alumínio para a condição com e sem dano mediante o emprego das estratégias de Park et al. (1999), Koo et al. (2009), Baptista et al. (2014) e Grisso & Inman (2010).

A técnica de compensação de Park et al. (1999) foi eficaz para o sistema estudado, sendo capaz de minimizar os efeitos da temperatura e, ainda assim, detectar a presença dos danos. A estratégia de Koo et al. (2009) determina a impedância normalizada, a qual foi capaz de minimizar significativamente os efeitos da temperatura. Entretanto, em algumas temperaturas, o RMSD não era capaz de detectar a presença do dano após a implementação deste técnica. A técnica de Baptista et al. (2014) realiza apenas a compensação do eixo horizontal (frequência) e, mesmo assim, obteve-se valores de CCDM iguais às técnicas anteriores. Porém, o índice métrico RMSD não foi capaz de detectar a presença do dano em algumas temperaturas após a implementação deste técnica. Por fim, a estratégia de compensação de Grisso & Inman (2010) não foi capaz de diferenciar os efeitos provocados pela variação de temperatura e pelo dano.

Conclui-se que para o sistema proposto, as técnicas de Park et al. (1999), Koo et al. (2009) e Baptista et al. (2014) são eficientes na compensação dos efeitos provocados pela variação da temperatura ambiente. Entretanto, as suas implementações exigem um alto custo operacional e tempo de duração. Além disso, a técnica de Park et al. (1999) é a mais apropriada para a executar o princípio do monitoramento da integridade estrutural, visto que mesmo após a sua implementação, foi possível detectar a presença dos danos para todas as temperaturas analisadas.

5.2 Trabalhos Futuros

A seguir são apresentadas algumas sugestões de trabalhos futuros que podem ampliar o entendimento dos tópicos abordados neste trabalho de graduação.

- Ampliar a faixa de frequência analisada;

- Aplicação das técnicas de compensação em outras partes do sinal de impedância: parte imaginária e fase;
- Verificar a eficácia da técnica de Grisso & Inman (2010) em maiores intensidades de dano e/ou danos posicionados nos transdutores piezoelétricos;
- Empregar as estratégias de compensação para os sinais obtidos no aquecimento e resfriamento, separadamente;
- Aplicar as técnicas em sinais com menor quantidade de ruídos;
- Analisar a viabilidade das técnicas em estruturas mais complexas.

6 Referências

- Abbas, S., Li, F., Abbas, Z., Abbasi, T. U. R., Tu, X. & Pasha, R. A. (2021), 'Experimental study of effect of temperature variations on the impedance signature of pzt sensors for fatigue crack detection', *Sound & Vibration* **55**, 1–18.
- Annamdas, V. G. M. & Soh, C. K. (2010), 'Application of electromechanical impedance technique for engineering structures: Review and future issues', *Journal of Intelligent Material Systems and Structures* **21**, 41–59.
- Ayres, J. W., Lalande, F., Chaudhry, Z. & Rogers, C. A. (1998), 'Qualitative impedan-cebased health monitoring of civil infrastructures', *Smart Materials and Structures* **7**, 599–605.
- Balageas, D., Fritzen, C. & Güemes, A. (2006), *Structural Health Monitoring*, 1 edn, ISTE Publishing Company.
- Baptista, F. G., Budoya, D. E., De Almeida, V. A. D. & Ulson, J. A. C. (2014), 'An experimental study on the effect of temperature on piezoelectric sensors for impe-dancebased structural health monitoring', *Sensors* **14** pp. 1208–1227.
- Baptista, F. G. & Filho, J. V. (2009), 'A new impedance measurement system for pzt based structural health monitoring', *IEEE Transaction on Instrumentation and Mea-surement* **58**(10), 3602–3608.
- Baptista, F. & Vieira Filho, J. (2010), 'Transducer loading effect on the performance of pzt-based shm systems', *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control* **57**(4), 933–941.
- Bastani, A., Amindavar, H., Shamshirsaz, M. & Sepehry, N. (2012), 'Identification of temperature variation and vibration disturbance in impedance-based structural he-alth monitoring using piezoelectric sensor array method', *Structural Health Monito-ring* **11**, 305–314.
- Bhalla, S. & Soh, C. K. (2004), 'Electromechanical impedance modeling for adhesively bonded piezo-transducers', *Journal of Intelligent Material Systems and Structures* **15**(12), 955–972.
- Bitencourt, T. F. & Júnior, V. S. (2010), 'Monitoramento da integridade estrutural de ae-ronaves'. Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Mecânica.
- Brammer, J. A. & Percival, C. M. (1970), 'Elevated-temperature elastic moduli of 2024 aluminum obtained by a laser-pulse technique', *Experimental Mechanics* **10**(6), 245–250.

- Chang, F.-K. (1999), *Structural Health Monitoring 2000*, 1 edn, CRC Press.
- Dias, L. L. (2020), 'Monitoramento da integridade estrutural utilizando a técnica de impedancia eletromecânica', Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP). São Paulo, Brasil.
- Dias, L. L. (2021), 'Monitoramento da integridade estrutural utilizando a técnica de impedancia eletromecânica', Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP). São Paulo, Brasil.
- Farrar, C. R., Lieven, N. A. J. & Bement, M. T. (2005), *Damage Prognosis for Aerospace, Civil and Mechanical Systems*, 1 edn, Wiley.
- Fiborek, P., Malinowski, P. H., Kudela, P., Wandowski, T. & Ostachowicz, W. M. (2018), 'Time-domain spectral element method for modelling of the electromechanical impedance of disbanded composites', *Journal of Intelligent Material Systems and Structures* **29**(16), 3214–3222.
- García, I., Zubia, J., Durana, G., Aldabaldetrek, G., Illarramendi, M. & Villatoro, J. (2015), 'Optical fiber sensors for aircraft structural health monitoring', *Sensors* **15**(7), 15494–15519.
- Giurgiutiu, V. & Kropas-Hughes, C. V. (2003), Comparative study of neural-network damage detection from a statistical set of electro-mechanical impedance spectra, Vol. 5047, International Society for Optics and Photonics, SPIE, pp. 108–119.
- Giurgiutiu, V., Reynolds, A. & Rogers, C. A. (1999), 'Experimental investigation of e/m impedance health monitoring of spot-welded structure joints', *Journal of Intelligent Material Systems and Structures* **10**(10), 802–812.
- Giurgiutiu, V. & Zagari, A. (2005), 'Damage detection in thin plates and aerospace structures with the electro-mechanical impedance method', *Structural Health Monitoring* **4**(2), 99–118. doi: 10.1177/1475921705049752.
- Gonzalez, C. G. (2012), Metodologias para reconhecimento de padrões em sistemas shm utilizando a técnica da impedância eletromecânica (e/m), Master's thesis, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho".
- Grisso, B. L. & Inman, D. J. (2010), 'Temperature corrected sensor diagnostics for impedance-based shm', *Journal of Sound and Vibration* **329**(12), 2323–2336.
- Gyuhae Park, Hoon Sohn, C. R. F. & Inman, D. J. (2003), 'Overview of piezoelectric impedance-based health monitoring and path forward', *The Shock and Vibration Digest* **35**(6), 451–463.

- Koo, K. Y., Park, S., Lee, J. J. & Yun, C. B. (2009), 'Automated impedance-based structural health monitoring incorporating effective frequency shift for compensating temperature effects', *Journal of Intelligent Material Systems and Structures* **20**(4), 367–377.
- Krishnamurthy, K., Lalande, F. & Rogers, C. A. (1996), Effects of temperature on the electrical impedance of piezoelectric sensors, in 'Smart Structures and Materials 1996: Smart Structures and Integrated Systems', Vol. 2717, International Society for Optics and Photonics, SPIE, pp. 302–310.
- Lee, U. (2009), *Spectral Element Method in Structural Dynamics*, 1 edn, Wiley.
- Liang, C., Sun, F. P. & Rogers, C. A. (1993), 'Coupled electromechanical analysis of piezoelectric ceramic actuator-driven systems: determination of the actuator power consumption and system energy transfer', *Smart Structures and Materials* . URL: <https://doi.org/10.1117/12.152767>.
- Liang, C., Sun, F. P. & Rogers, C. A. (1996), 'Electro-mechanical impedance modeling of active material systems', *Smart Materials and Structures* **5**(2), 171–186.
- Lim, H. J., Kim, M. K., Sohn, H. & Park, C. Y. (2011), 'Impedance based damage detection under varying temperature and loading conditions', *Ndt and E International* **44**, 740–750.
- Lopes, K. W. (2018), 'Detecção de falhas experimentais em estruturas mecânicas utilizando sistemas imunológicos artificiais', Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP). São Paulo, Brasil.
- Louzada, D. R. (2019), Detecção e caracterização de danos estruturais através de sensores a rede de bragg e redes neurais artificiais, Master's thesis, PUC - Rio.
- Moura Junior, J. R. V. & Steffen Junior, V. (2006), 'Impedance-based health monitoring for aeronautic structures using statistical meta-modeling', *Journal of Intelligent Material Systems and Structure* **17**(11), 1023–1036.
- Na, W. S. & Baek, J. (2018), 'A review of the piezoelectric electromechanical impedance based structural health monitoring technique for engineering structures', *Sensors* **18**(5).
- Padiyar, M. & Balasubramaniam, K. (2013), 'Lamb-wave-based structural health monitoring technique for inaccessible regions in complex composite structures', *Structural Control and Health Monitoring* **21**(5), 817–832.

- Park, G., Cudney, H. H. & Inman, D. J. (2000), 'An integrated health monitoring technique using structural impedance sensors', *Journal of Intelligent Material Systems and Structures* **11**(6), 448–455.
- Park, G., Cudney, H. & Inman, D. J. (2000a), 'Impedance-based health monitoring of civil structural components', *Journal of Infrastructure Systems* **6**, 153–160.
- Park, G., Cudney, H. & Inman, D. J. (2001), 'Feasibility of using impedance-based damage assessment for pipeline systems', *Earthquake Engineering and Structural Dynamics Journal* **30**(10), 1463–1474.
- Park, G., Kabeya, K., Cudney, H. H. & Inman, D. J. (1999), 'Impedance-based structural health monitoring for temperature varying applications', *JSME International Journal Series A* **42**(2), 249–258.
- Peairs, D. M., Park, G. & Inman, D. J. (2004), 'Improving accessibility of the impedance based structural health monitoring method', *Journal of Intelligent Material Systems and Structures* **15**(2), 129–139. doi: 10.1177/1045389X04039914.
- Reusser, R. S., Hollanda, S. D., Chimenti, D. E. & Roberts, R. A. (2014), 'Reflection and transmission of guided ultrasonic plate waves by vertical stiffeners', *The Journal of the Acoustical Society of America* **136**(1), 170–182.
- Sepehry, N., Shamshirsaz, M. & Abdollahi, F. (2011), 'Temperature variation effect compensation in impedance-based structural health monitoring using neural networks', *Journal of Intelligent Material Systems and Structures* **22**, 1975–1982.
- Sepehry, N., Shamshirsaz, M. & Bastani, A. (2010), 'Experimental and theoretical analysis in impedance-based structural health monitoring with varying temperature', *Structural Health Monitoring* **10**(6), 573–585.
- Sun, F. P., Chaudhry, Z. A., Rogers, C. A., Majmundar, M. & Liang, C. (1995b), Automated real-time structure health monitoring via signature pattern recognition, in 'Smart Structures and Materials 1995: Smart Structures and Integrated Systems', Vol. 2443, SPIE, pp. 236–247.
- Sun, F. P., Chaudhry, Z., Liang, C. & Rogers, C. A. (1995a), 'Truss structure integrity identification using pzt sensor-actuator', *Journal of Intelligent Material Systems and Structures* **6**(1), 134–139.
- Tebaldi, A. (2014), Detecção de falhas estruturais usando sensores e atuadores piezelétricos e algoritmos genéticos, Master's thesis, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho".

- Tseng, K. K. & Wang, L. (2004), 'Smart piezoelectric transducers for in situ health monitoring of concrete', *Smart Materials and Structures* **13**(5), 1017–1024.
- Tsuruta, K. M. (2008), Monitoramento de integridade estrutural de materiais compostos sujeitos a impactos empregando a técnica da impedância eletromecânica, Master's thesis, Universidade Federal de Uberlândia.
- Tziavos, N. I., Hemida, H., Dirar, S., Papaelias, M., Metje, N. & Baniotopoulos, C. (2020), 'Structural health monitoring of grouted connections for offshore wind turbines by means of acoustic emission: An experimental study', *Renewable Energy* **147**, 130–140.
- Zhou, S. W., Liang, C. & Rogers, C. A. (1996), 'An impedance-based system modeling approach for induced strain actuator-driven structures', *Journal of Vibration and Acoustics* **118**, 323–331.

Apêndices

A Códigos do Python

Este apêndice contém os códigos desenvolvidos no *software* Python para a aplicação das quatro técnicas de compensação.

A.1 Técnica de Park et al. (1999)

Bibliotecas

```
import matplotlib.pyplot as plt
import matplotlib as mpl
import numpy as np
import math as mt
import importlib
import cmath
from scipy.signal import argrextrema
import matplotlib.gridspec as gridspec
```

Local com os dados salvos

```
import os
os.chdir("D:\Documents\TCC\Algoritmos")
```

Importar os sinais

```
from Algoritmo import Baseline1, Baseline2, Baseline3, Falha1_1, Falha1_2, Falha1_3,
Falha2_1, Falha2_2, Falha2_3
```

Baseline

Iterações

```
f1 = np.r_[27999:47001:1]
f2 = np.r_[45000:28999:-1]
f = np.r_[30000:45001:1]
```

```

Diff = []
real = []
arrb = np.array(Baseline3) # O índice '3' corresponde ao valor médio obtido para o
    sinal no aquecimento (1) e resfriamento (2)
Y = np.r_[0,7,23,31,37,45]
Tm = np.r_[-10,4,36,52,64,80]
Mtb = []
Ab = []
for y in Y:
    a = 1
    M = []
    M2 = 1000000000000000
    M3 = 1000000000000000
    M4 = 1000000000000000
    while True:
        soma = []
        Diff = []
        S = 0
        Resu = []
        if y<17:
            for i in f1:
                arrb[[y],[i],[2]] = arrb[[y],[i+1],[2]]
                Re = arrb[[y],[i],[2]]
                D = (arrb[[17],[i],[2]] - Re)
                Diff.append(D)
        if y>17:
            for i in f2:
                Aux = arrb[[y],[i],[2]]
                arrb[[y],[i],[2]] = arrb[[y],[i-1],[2]]
                arrb[[y],[i+1],[2]] = Aux
                Re = arrb[[y],[i],[2]]
                D = (arrb[[17],[i],[2]] - Re)
                Diff.append(D)
        Media = sum(Diff)/len(Diff)
        for i in f:
            Re2 = arrb[[y],[i],[2]] + Media
            S = (arrb[[17],[i],[2]] - Re2)**2 + S
            Resu.append(Re2)
        M.append(S)

```

```

print(S)
print(min(M))
if M2<=min(M):
    Mtb.append(min(M))
    Ab.append(a)
    print(Mtb)
    break
if S != min(M) and S<235000:
    M2 = min(M)
a = a + 1

```

Gráfico

```

f = np.r_[30000:45001:1]
Y = np.r_[0,7,17,23,31,37,45]
Tm = np.r_[-10,4,24,36,52,64,80]
real = []
leg = ['-10 °C','4 °C','24 °C (Referência)','36 °C','52 °C','64 °C','80 °C']
clr = ['cyan','darkorange','black','blue','limegreen','red','violet']
lwdh = [1]*3 + [2]*3 + [3]*1
lsty = ['-', '-.', '-']*2 + ['-']
a = 0
b = 0
Diff = []

fig = plt.figure(figsize=(11,8))
plt.grid()
plt.rcParams['xtick.labelsize'] = 20
plt.rcParams['ytick.labelsize'] = 20
h = 0

```

```

for y in Y:
    for i in f:
        D = (arrb[[17],[i],[2]] - arrb[[y],[i],[2]])
        Diff.append(D)
    Media = sum(Diff)/len(Diff)
    for i in f:
        Re2 = arrb[[y],[i],[2]] + Media
        real.append(Re2)

```

```

plt.plot(f,real,label = leg[a],color = clr[a],lw = lwdh[a],ls = lsty[a])
plt.legend(loc = 2, ncol = 2, prop = "size": 15)
plt.xlabel('Frequência [Hz]',fontsize = 24)
plt.ylabel('Parte Real [\Omega]',fontsize = 24)
real = []
Diff = []
a = a + 1

plt.show()
fig.savefig('Base_Park.jpg',dpi = 300)

```

Falha 1

Iterações

```

f1 = np.r_[27999:47001:1]
f2 = np.r_[45000:28999:-1]
f = np.r_[30000:45001:1]
Diff = []
real = []
arrf1 = np.array(Falha1_3)
Y = np.r_[0,3,7,9,12,15,18]
Tm = np.r_[-10,5,25,35,50,65,80]
Mtf1 = []
Af1 = []
for y in Y:
    a = 1
    M = []
    M2 = 1000000000000000
    M3 = 1000000000000000
    M4 = 1000000000000000
    while True:
        soma = []
        Diff = []
        S = 0
        Resu = []
        for i in f2:
            Aux = arrf1[[y],[i],[2]]

```

```

    arrf1[[y],[i],[2]] = arrf1[[y],[i-1],[2]]
    arrf1[[y],[i+1],[2]] = Aux
    Re = arrf1[[y],[i],[2]]
    D = (arr[[17],[i],[2]] - Re)
    Diff.append(D)
Media = sum(Diff)/len(Diff)
for i in f:
    Re2 = arrf1[[y],[i],[2]] + Media
    S = (arr[[17],[i],[2]] - Re2)**2 + S
    Resu.append(Re2)
M.append(S)
print(S)
print(min(M))
if M2<=min(M):
    Mtf1.append(min(M))
    Af1.append(a)
    print(Mtf1)
    break
if S != min(M) and S<235000:
    M2 = min(M)
a = a + 1

```

Gráfico

```

f = np.r_[30000:45001:1]
Y = np.r_[0,3,7,9,12,15,18]
Tm = np.r_[-10,5,25,35,50,65,80]
real = []
leg = ['-10 °C','5 °C','25 °C','35 °C','50 °C','65 °C','80 °C']
clr = ['cyan','darkorange','saddlebrown','blue','limegreen','red','violet']
lwdh = [1]*3 + [2]*3 + [3]*1
lsty = ['-','-.-','-']*2 + ['-']
a = 0
b = 0
Diff = []

fig = plt.figure(figsize=(11,8))
plt.grid()
plt.rcParams['xtick.labelsize'] = 20

```

```

plt.rcParams['ytick.labelsize'] = 20
h = 0

for y in Y:
    for i in f:
        D = (arr[[17],[i],[2]] - arrf1[[y],[i],[2]])
        Diff.append(D)
    Media = sum(Diff)/len(Diff)
    for i in f:
        Re3 = arrf1[[y],[i],[2]] + Media
        real.append(Re3)

plt.plot(f,real,label = leg[a],color = clr[a],lw = lwdh[a],ls = lsty[a])
plt.legend(loc = 2, ncol = 2, prop = "size": 15)
plt.xlabel('Frequência [Hz]',fontsize = 24)
plt.ylabel('Parte Real [\Omega]',fontsize = 24)
real = []
Diff = []
a = a + 1

plt.show()
fig.savefig('Falha1_Park.jpg',dpi = 300)

```

Falha 2

Iterações

```

f1 = np.r_[27999:47001:1]
f2 = np.r_[45000:28999:-1]
f = np.r_[30000:45001:1]
Diff = []
real = []
arrf2 = np.array(Falha2.3)
Y = np.r_[0,3,7,9,12,15,18]
Tm = np.r_[-10,5,25,35,50,65,80]
Mtf2 = []
Af2 = []
for y in Y:
    a = 1

```



```

M = []
M2 = 1000000000000000
M3 = 1000000000000000
M4 = 1000000000000000
while True:
    soma = []
    Diff = []
    S = 0
    Resu = []
    if y<17:
        for i in f1:
            arrf2[[y],[i],[2]] = arrf2[[y],[i+1],[2]]
            Re = arrf2[[y],[i],[2]]
            D = (arr[[17],[i],[2]] - Re)
            Diff.append(D)
    if y>17:
        for i in f2:
            Aux = arrf2[[y],[i],[2]]
            arrf2[[y],[i],[2]] = arrf2[[y],[i-1],[2]]
            arrf2[[y],[i+1],[2]] = Aux
            Re = arrf2[[y],[i],[2]]
            D = (arr[[17],[i],[2]] - Re)
            Diff.append(D)
    Media = sum(Diff)/len(Diff)
    for i in f:
        Re2 = arrf2[[y],[i],[2]] + Media
        S = (arr[[17],[i],[2]] - Re2)**2 + S
        Resu.append(Re2)
    M.append(S)
    print(S)
    print(min(M))
    if M2<=min(M):
        Mtf2.append(min(M))
        Af2.append(a)
        print(Mtf2)
        break
    if S != min(M) and S<235000:
        M2 = min(M)
a = a + 1

```

Gráfico

```
f = np.r_[30000:45001:1]
Y = np.r_[0,3,7,9,12,15,18]
Tm = np.r_[-10,5,25,35,50,65,80]
real = []
leg = ['-10 °C','5 °C','25 °C','35 °C','50 °C','65 °C','80 °C']
clr = ['cyan','darkorange','saddlebrown','blue','limegreen','red','violet']
lwdh = [1]*3 + [2]*3 + [3]*1
lsty = ['-','-.-','-']*2 + ['-']
a = 0
b = 0
Diff = []

fig = plt.figure(figsize=(11,8))
plt.grid()
plt.rcParams['xtick.labelsize'] = 20
plt.rcParams['ytick.labelsize'] = 20
h = 0

for y in Y:
    for i in f:
        D = (arr[[17],[i],[2]] - arrf2[[y],[i],[2]])
        Diff.append(D)
    Media = sum(Diff)/len(Diff)
    for i in f:
        Re3 = arrf2[[y],[i],[2]] + Media
        real.append(Re3)

plt.plot(f,real,label = leg[a],color = clr[a],lw = lwdh[a],ls = lsty[a])
plt.legend(loc = 2, ncol = 2, prop = "size": 15)
plt.xlabel('Frequência [Hz]',fontsize = 24)
plt.ylabel('Parte Real [\Omega]',fontsize = 24)
real = []
Diff = []
a = a + 1

plt.show()
fig.savefig('Falha2_Park.jpg',dpi = 300)
```

A.2 Técnica de Koo et al. (2009)

Bibliotecas

```
import matplotlib.pyplot as plt
import matplotlib as mpl
import numpy as np
import math as mt
import importlib
import cmath
import statistics
from fractions import Fraction as F
from scipy.signal import matplotlib.gridspec as gridspec
```

Local com os dados salvos

```
import os
os.chdir("D:\Documents\TCC\Algoritmos")
```

Importar os sinais

```
from Algoritmo import Baseline1, Baseline2, Baseline3, Falha1_1, Falha1_2, Falha1_3,
Falha2_1, Falha2_2, Falha2_3
```

Baseline

Iterações

```
f = np.r_[30000:45001:1]
f1 = np.r_[30000:46001:1]
f2 = np.r_[45000:28999:-1]
arrb = np.array(Baseline3)
Y = np.r_[0,7,23,31,37,45]
Tm = np.r_[-10,4,36,52,64,80]
Ctb = []
ReH = []
df = 1
Ab = []
```

```

for i in f:
    ReH.append(arrb[[17],[i],[2]])
MediaH = sum(ReH)/len(ReH)
desh = np.concatenate(ReH, axis=0)
DesvioH = statistics.pstdev(desh)

for y in Y:
    a = 1
    CC2 = -1000
    C = []
    while True:
        B1 = []
        ReD = []
        for i in f:
            ReD.append(arrb[[y],[i],[2]])
        MediaD = sum(ReD)/len(ReD)
        desd = np.concatenate(ReD, axis=0)
        DesvioD = statistics.pstdev(desd)
        if y<17:
            for i in f1:
                arrb[[y],[i],[2]] = arrb[[y],[i+(df)],[2]]
                arrb[[y],[i+(df)],[2]] = arrb[[y],[i+(2*df)],[2]]
        if y>17:
            for i in f2:
                Re = arrb[[y],[i],[2]]
                arrb[[y],[i],[2]] = arrb[[y],[i-(df)],[2]]
                arrb[[y],[i-(df)],[2]] = Re
        for i in f:
            A1 = (arrb[[17],[i],[2]] - MediaH)*(arrb[[y],[i],[2]] - MediaD)
            B1.append(A1)
        CC = sum(B1)/(DesvioH*DesvioD*len(f))
        C.append(CC)
        print(CC)
        print(max(C))
        if CC2>=max(C):
            Ctb.append(max(C))
            Ab.append(a)
            print(Ctb)

```

```

        break
    if CC != max(C) and CC>0.55:
        CC2 = max(C)
    a = a + 1

```

Gráfico

```

f = np.r_[30000:45001:1]
Y = np.r_[0,7,17,23,31,37,45]
Tm = np.r_[-10,4,24,36,52,64,80]
realb = []
real = []
Mediab = []
Desviob = []
leg = ['-10 °C','4 °C','24 °C (Referência)','36 °C','52 °C','64 °C','80 °C']
clr = ['cyan','darkorange','black','blue','limegreen','red','violet']
lwdh = [1]*3 + [2]*3 + [3]*1
lsty = ['-', '-.', '-']*2 + ['-']
a = 0
A = 0

```

```

fig = plt.figure(figsize=(11,8))
plt.grid()
plt.rcParams['xtick.labelsize'] = 20
plt.rcParams['ytick.labelsize'] = 20

```

```

for y in Y:
    Re = []
    for i in f:
        Re.append(arrb[[y],[i],[2]])
    Med = sum(Re)/len(Re)
    Mediab.append(Med)
    des = np.concatenate(Re, axis=0)
    Des = statistics.pstdev(des)
    Desviob.append(Des)

```

```

for y in Y:
    for i in f:

```

```

arrb[[y],[i],[2]] = (arrb[[y],[i],[2]] - Mediab[a])/(Desviob[a]*Desviob[2])
realb.append(arrb[[y],[i],[2]])

plt.plot(f,realb,label = leg[A],color = clr[A],lw = lwdh[A],ls = lsty[A])
plt.legend(loc = 2, ncol = 2, prop = "size":15)
plt.xlabel('Frequência [Hz]',fontsize = 24)
plt.ylabel('Parte Real [\Omega^{-1}]',fontsize = 24)
A = A + 1
realb = []
a = a + 1

plt.show()
fig.savefig('Base_Koo.jpg',dpi = 300)

```

Falha 1

Iterações

```

f = np.r_[30000:45001:1]
f1 = np.r_[30000:46001:1]
f2 = np.r_[45000:28999:-1]
arrf1 = np.array(Falha1_3)
arr = np.array(Baseline3)
Y = np.r_[0,3,7,9,12,15,18]
Tm = np.r_[-10,5,25,35,50,65,80]
Ctf1 = []
ReH = []
df = 1
k = 0

for i in f:
    ReH.append(arr[[17],[i],[2]])
MediaH = sum(ReH)/len(ReH)
desh = np.concatenate(ReH, axis=0)
DesvioH = statistics.pstdev(desh)

for y in Y:
    CC2 = -1000
    C = []

```

```

while True:
    B1 = []
    ReD = []
    for i in f:
        ReD.append(arrf1[[y],[i],[2]])
    MediaD = sum(ReD)/len(ReD)
    desd = np.concatenate(ReD, axis=0)
    DesvioD = statistics.pstdev(desd)
    for i in f2:
        Re = arrf1[[y],[i],[2]]
        arrf1[[y],[i],[2]] = arrf1[[y],[i-(df)],[2]]
        arrf1[[y],[i-(df)],[2]] = Re
    for i in f:
        A1 = (arr[[17],[i],[2]] - MediaH)*(arrf1[[y],[i],[2]] - MediaD)
        B1.append(A1)
    CC = sum(B1)/(DesvioH*DesvioD*len(f))
    C.append(CC)
    print(CC)
    print(max(C))
    if CC2>=max(C):
        Ctf1.append(max(C))
        print(Ctf1)
        break
    if CC != max(C) and CC>0.55:
        CC2 = max(C)

```

Gráfico

```

f = np.r_[30000:45001:1]
Y = np.r_[0,3,7,9,12,15,18]
Tm = np.r_[-10,5,25,35,50,65,80]
real = []
Mediaf1 = []
Desviof1 = []
leg = ['-10 °C', '5 °C', '25 °C', '35 °C', '50 °C', '65 °C', '80 °C']
clr = ['cyan', 'darkorange', 'saddlebrown', 'blue', 'limegreen', 'red', 'violet']
lwdh = [1]*3 + [2]*3 + [3]*1
lsty = ['-','-', '-']*2 + ['-']

```

```

a = 0
A = 0
Re = []

fig = plt.figure(figsize=(11,8))
plt.grid()
plt.rcParams['xtick.labelsize'] = 20
plt.rcParams['ytick.labelsize'] = 20

for i in f:
    Re.append(arr[[17],[i],[2]])
MediaB = sum(Re)/len(Re)
des = np.concatenate(Re, axis=0)
DesvioB = statistics.pstdev(des)

for y in Y:
    Re = []
    for i in f:
        Re.append(arrf1[[y],[i],[2]])
        Med = sum(Re)/len(Re)
        Mediaf1.append(Med)
        des = np.concatenate(Re, axis=0)
        Des = statistics.pstdev(des)
        Desviof1.append(Des)

for y in Y:
    for i in f:
        Re2 = (arrf1[[y],[i],[2]] - Mediaf1[a])/(Desviof1[a]*DesvioB)
        real.append(Re2)

plt.plot(f,real,label = leg[A],color = clr[A],lw = lwdh[A],ls = lsty[A])
plt.legend(loc = 1, ncol = 2, prop = "size":15)
plt.xlabel('Frequência [Hz]',fontsize = 24)
plt.ylabel('Parte Real [\Omega^{-1}]',fontsize = 24)
plt.ylim([-0.5, 1])
A = A + 1
real = []
a = a + 1

```



```
plt.show()
fig.savefig('Falha1_Koo.jpg',dpi = 300)
```

Falha 2

Iterações

```
f = np.r_[30000:45001:1]
f1 = np.r_[30000:46001:1]
f2 = np.r_[45000:28999:-1]
arrf2 = np.array(Falha2_3)
arr = np.array(Baseline3)
Y = np.r_[0,3,7,9,12,15,18]
Tm = np.r_[-10,5,25,35,50,65,80]
Ctf2 = []
ReH = []
df = 1
k = 0

for i in f:
    ReH.append(arr[[17],[i],[2]])
MediaH = sum(ReH)/len(ReH)
desh = np.concatenate(ReH, axis=0)
DesvioH = statistics.pstdev(desh)

for y in Y:
    CC2 = -1000
    C = []
    while True:
        B1 = []
        ReD = []
        for i in f:
            ReD.append(arrf2[[y],[i],[2]])
        MediaD = sum(ReD)/len(ReD)
        desd = np.concatenate(ReD, axis=0)
        DesvioD = statistics.pstdev(desd)
        if y<7:
            for i in f1:
                arrf2[[y],[i],[2]] = arrf2[[y],[i+(df)],[2]]
```

```

        arrf2[[y],[i+(df)],[2]] = arrf2[[y],[i+(2*df)],[2]]
if y>=7:
    for i in f2:
        Re = arrf2[[y],[i],[2]]
        arrf2[[y],[i],[2]] = arrf2[[y],[i-(df)],[2]]
        arrf2[[y],[i-(df)],[2]] = Re
    for i in f:
        A1 = (arr[[17],[i],[2]] - MediaH)*(arrf2[[y],[i],[2]] - MediaD)
        B1.append(A1)
    CC = sum(B1)/(DesvioH*DesvioD*len(f))
    C.append(CC)
    print(CC)
    print(max(C))
    if CC2>=max(C):
        Ctf1.append(max(C))
        print(Ctf2)
        break
    if CC != max(C) and CC>0.55:
        CC2 = max(C)

```

Gráfico

```

f = np.r_[30000:45001:1]
Y = np.r_[0,3,7,9,12,15,18]
Tm = np.r_[-10,5,25,35,50,65,80]
real = []
Mediaf2 = []
Desviof2 = []
leg = ['-10 °C','5 °C','25 °C','35 °C','50 °C','65 °C','80 °C']
clr = ['cyan','darkorange','saddlebrown','blue','limegreen','red','violet']
lwdh = [1]*3 + [2]*3 + [3]*1
lsty = ['-','-', '-']*2 + ['-']
a = 0
A = 0
Re = []

fig = plt.figure(figsize=(11,8))
plt.grid()

```

```

plt.rcParams['xtick.labelsize'] = 20
plt.rcParams['ytick.labelsize'] = 20

for i in f:
    Re.append(arr[[17],[i],[2]])
MediaB = sum(Re)/len(Re)
des = np.concatenate(Re, axis=0)
DesvioB = statistics.pstdev(des)

for y in Y:
    Re = []
    for i in f:
        Re.append(arrf2[[y],[i],[2]])
        Med = sum(Re)/len(Re)
        Mediaf2.append(Med)
        des = np.concatenate(Re, axis=0)
        Des = statistics.pstdev(des)
        Desviof2.append(Des)

for y in Y:
    for i in f:
        Re2 = (arrf2[[y],[i],[2]] - Mediaf2[a])/(Desvio2[a]*DesvioB)
        real.append(Re2)

plt.plot(f,real,label = leg[A],color = clr[A],lw = lwdh[A],ls = lsty[A])
plt.legend(loc = 1, ncol = 2, prop = "size":15)
plt.xlabel('Frequência [Hz]',fontsize = 24)
plt.ylabel('Parte Real [\Omega^{-1}]',fontsize = 24)
plt.ylim([-0.5, 1])
A = A + 1
real = []
a = a + 1

plt.show()
fig.savefig('Falha2_Koo.jpg',dpi = 300)

```

A.3 Técnica de Baptista et al. (2014)

Bibliotecas

```
import matplotlib.pyplot as plt
import matplotlib as mpl
import numpy as np
import math as mt
import importlib
import cmath
from scipy.signal import matplotlib.gridspec
```

Local com os dados salvos

```
import os
os.chdir("D:\Documents\TCC\Algoritmos")
```

Importar os sinais

```
from Algoritmo import Baseline1, Baseline2, Baseline3, Falha1_1, Falha1_2, Falha1_3,
Falha2_1, Falha2_2, Falha2_3
```

Baseline

Iterações

```
f = np.r_[30000:45001:1]
f1 = np.r_[30000:46001:1]
f2 = np.r_[45000:28999:-1]
real = []
ReD = []
ReH = []
Ctb = []
arrb = np.array(Baseline3)
Y = np.r_[0,7,23,31,37,45]
Tm = np.r_[-10,4,36,52,64,80]
df = 1
```

```
for i in f:
```

```

    ReH.append(arrb[[17],[i],[2]])
MediaH = sum(ReH)/len(ReH)
for y in Y:
    CC2 = -1000
    a = 1
    C = []
    ReD = []
    while True:
        B1 = []
        B2 = []
        B3 = []
        for i in f:
            ReD.append(arrb[[y],[i],[2]])
        MediaD = sum(ReD)/len(ReD)
        if y<17:
            for i in f1:
                Re = arrb[[y],[i],[2]]
                arrb[[y],[i],[2]] = arrb[[y],[i+(df)],[2]]
                arrb[[y],[i+(df)],[2]] = arrb[[y],[i+(2*df)],[2]]
        if y>17:
            for i in f2:
                Re = arrb[[y],[i],[2]]
                arrb[[y],[i],[2]] = arrb[[y],[i-(df)],[2]]
                arrb[[y],[i-(df)],[2]] = Re
        for i in f:
            A1 = (arrb[[17],[i],[2]] - MediaH)*(arrb[[y],[i],[2]] - MediaD)
            A2 = (arrb[[17],[i],[2]] - MediaH)**2
            A3 = (arrb[[y],[i],[2]] - MediaD)**2
            B1.append(A1)
            B2.append(A2)
            B3.append(A3)
        CC = sum(B1)/(mt.sqrt(sum(B2))*mt.sqrt(sum(B3)))
        C.append(CC)
    print(CC)
    print(max(C))
    if CC2>=max(C):
        Ctb.append(max(C))
        print(Ctb)
        break

```

```

if CC != max(C) and CC>0.55:
    CC2 = max(C)
a = a + 1

```

Gráfico

```

f = np.r_[30000:45001:1]
Y = np.r_[0,7,17,23,31,37,45]
Tm = np.r_[-10,4,24,36,52,64,80]
real = []
leg = ['-10 °C','4 °C','24 °C (Referência)','36 °C','52 °C','64 °C','80 °C']
clr = ['cyan','darkorange','black','blue','limegreen','red','violet']
lwdh = [1]*3 + [2]*3 + [3]*1
lsty = ['-', '-.', '-']*2 + ['-']
a = 0

fig = plt.figure(figsize=(11,8))
plt.grid()
plt.rcParams['xtick.labelsize'] = 20
plt.rcParams['ytick.labelsize'] = 20

for y in Y:
    for i in f:
        real.append(arrb[[y],[i],[2]])

plt.plot(f,real,label = leg[a],color = clr[a],lw = lwdh[a],ls = lsty[a])
plt.legend(loc = 2, ncol = 2, prop = "size":15)
plt.xlabel('Frequência [Hz]',fontsize = 24)
plt.ylabel('Parte Real [\Omega]',fontsize = 24)
a = a + 1
real = []

plt.show()
fig.savefig('Base_Baptista.jpg',dpi = 300)

```

Falha 1

Iterações

```
f = np.r_[30000:45001:1]
f1 = np.r_[30000:46001:1]
f2 = np.r_[45000:28999:-1]
real = []
ReD = []
ReH = []
Ctf1 = []
arrf1 = np.array(Falha1_3)
arr = np.array(Baseline3)
Y = np.r_[0,3,7,9,12,15,18]
Tm = np.r_[-10,5,25,35,50,65,80]
df = 1
```

```
for i in f:
    ReH.append(arr[[17],[i],[2]])
MediaH = sum(ReH)/len(ReH)
```

```
for y in Y:
    CC2 = -1000
    C = []
    ReD = []
    while True:
        B1 = []
        B2 = []
        B3 = []
        for i in f:
            ReD.append(arrf1[[y],[i],[2]])
        MediaD = sum(ReD)/len(ReD)
        for i in f2:
            Re = arrf1[[y],[i],[2]]
            arrf1[[y],[i],[2]] = arrf1[[y],[i-(df)],[2]]
            arrf1[[y],[i-(df)],[2]] = Re
        for i in f:
            A1 = (arr[[17],[i],[2]] - MediaH)*(arrf1[[y],[i],[2]] - MediaD)
            A2 = (arr[[17],[i],[2]] - MediaH)**2
            A3 = (arrf1[[y],[i],[2]] - MediaD)**2
```

```

B1.append(A1)
B2.append(A2)
B3.append(A3)
CC = sum(B1)/(mt.sqrt(sum(B2))*mt.sqrt(sum(B3)))
C.append(CC)
print(CC)
print(max(C))
if CC2 >= max(C):
    Ctf2.append(max(C))
    print(Ctf1)
    break
if CC != max(C) and CC > 0.55:
    CC2 = max(C)

```

Gráfico

```

f = np.r_[30000:45001:1]
Y = np.r_[0,3,7,9,12,15,18]
Tm = np.r_[-10,5,25,35,50,65,80]
leg = ['-10 °C','5 °C','25 °C','35 °C','50 °C','65 °C','80 °C']
clr = ['cyan','darkorange','saddlebrown','blue','limegreen','red','violet']
lwdh = [1]*3 + [2]*3 + [3]*1
lsty = ['-','-','-']*2 + ['-']
a = 0
real = []

fig = plt.figure(figsize=(11,8))
plt.grid()
plt.rcParams['xtick.labelsize'] = 20
plt.rcParams['ytick.labelsize'] = 20

for y in Y:
    for i in f:
        real.append(arrf1[[y],[i],[2]])

plt.plot(f,real,label = leg[a],color = clr[a],lw = lwdh[a],ls = lsty[a])
plt.legend(loc = 2, ncol = 2, prop = "size":15)
plt.xlabel('Frequência [Hz]',fontsize = 24)

```



```

plt.ylabel('Parte Real [\Omega]', fontsize = 24)
plt.ylim([35, 145])
a = a + 1
real = []

plt.show()
fig.savefig('Falha1_Baptista.jpg', dpi = 300)

```

Falha 2

Iterações

```

f = np.r_[30000:45001:1]
f1 = np.r_[30000:46001:1]
f2 = np.r_[45000:28999:-1]
real = []
ReD = []
ReH = []
Ctf2 = []
arrf2 = np.array(Falha2_3)
arr = np.array(Baseline3)
Y = np.r_[0,3,7,9,12,15,18]
Tm = np.r_[-10,5,25,35,50,65,80]
df = 1

for i in f:
    ReH.append(arr[[17],[i],[2]])
MediaH = sum(ReH)/len(ReH)

for y in Y:
    CC2 = -1000
    C = []
    ReD = []
    while True:
        B1 = []
        B2 = []
        B3 = []
        for i in f:
            ReD.append(arrf2[[y],[i],[2]])

```

```

MediaD = sum(ReD)/len(ReD)
if y<7:
    for i in f1:
        Re = arrf2[[y],[i],[2]]
        arrf2[[y],[i],[2]] = arrf2[[y],[i+(df)],[2]]
        arrf2[[y],[i+(df)],[2]] = arrf2[[y],[i+(2*df)],[2]]
if y>=7:
    for i in f2:
        Re = arrf2[[y],[i],[2]]
        arrf2[[y],[i],[2]] = arrf2[[y],[i-(df)],[2]]
        arrf2[[y],[i-(df)],[2]] = Re
for i in f:
    A1 = (arr[[17],[i],[2]] - MediaH)*(arrf2[[y],[i],[2]] - MediaD)
    A2 = (arr[[17],[i],[2]] - MediaH)**2
    A3 = (arrf2[[y],[i],[2]] - MediaD)**2
    B1.append(A1)
    B2.append(A2)
    B3.append(A3)
CC = sum(B1)/(mt.sqrt(sum(B2))*mt.sqrt(sum(B3)))
C.append(CC)
print(CC)
print(max(C))
if CC2>=max(C):
    Ctf2.append(max(C))
    print(Ctf2)
    break
if CC != max(C) and CC>0.55:
    CC2 = max(C)

```

Gráfico

```

f = np.r_[30000:45001:1]
Y = np.r_[0,3,7,9,12,15,18]
Tm = np.r_[-10,5,25,35,50,65,80]
leg = ['-10 °C','5 °C','25 °C','35 °C','50 °C','65 °C','80 °C']
clr = ['cyan','darkorange','saddlebrown','blue','limegreen','red','violet']
lwdh = [1]*3 + [2]*3 + [3]*1
lsty = ['-','-', '-']*2 + ['-']

```

```

a = 0
real = []

fig = plt.figure(figsize=(11,8))
plt.grid()
plt.rcParams['xtick.labelsize'] = 20
plt.rcParams['ytick.labelsize'] = 20

for y in Y:
    for i in f:
        real.append(arrf2[[y],[i],[2]])

plt.plot(f,real,label = leg[a],color = clr[a],lw = lwdh[a],ls = lsty[a])
plt.legend(loc = 2, ncol = 2, prop = "size":15)
plt.xlabel('Frequência [Hz]',fontsize = 24)
plt.ylabel('Parte Real [\Omega]',fontsize = 24)
plt.ylim([35, 145])
a = a + 1
real = []

plt.show()
fig.savefig('Falha2_Baptista.jpg',dpi = 300)

```

A.4 Técnica de Grisso & Inman (2010)

Bibliotecas

```

import matplotlib.pyplot as plt
import matplotlib as mpl
import numpy as np
import math as mt
import importlib
import cmath
import statistics
from fractions import Fraction as F
import matplotlib.gridspec as gridspec

```

Local com os dados salvos

```
import os
os.chdir("D:\Documents\TCC\Algoritmos")
```

Importar os sinais

```
from Algoritmo import Baseline1, Baseline2, Baseline3, Falha1_1, Falha1_2, Falha1_3,
Falha2_1, Falha2_2, Falha2_3
```

Cálculo da Susceptância

Baseline

```
f = np.r_[1000:20001:1]
Y = np.r_[0,7,17,23,31,37,45]
Tm = np.r_[-10,4,24,36,52,64,80]
arr = np.array(Baseline3)

for y in Y:
    B1 = []
    for i in f:
        B = (-arr[[y],[i],[3]])/(arr[[y],[i],[3]]**2 + arr[[y],[i],[2]]**2)
        B1.append(B)
    if y == 0:
        Bb3 = np.array(B1)
    else:
        B2 = np.array(B1)
        Bb3 = np.hstack([Bb3,B2])
```

Falha 1

```
f = np.r_[1000:20001:1]
Y = np.r_[0,3,7,9,12,15,18]
Tm = np.r_[-10,5,25,35,50,65,80]
arr = np.array(Falha1_3)
```

```
for y in Y:
    B1 = []
```

```

for i in f:
    B = (-arr[[y],[i],[3]])/(arr[[y],[i],[3]]**2 + arr[[y],[i],[2]]**2)
    B1.append(B)
if y == 0:
    Bf1 = np.array(B1)
else:
    B2 = np.array(B1)
    Bf1 = np.hstack([Bf1,B2])

```

Falha 2

```

f = np.r_[1000:20001:1]
Y = np.r_[0,3,7,9,12,15,18]
Tm = np.r_[-10,5,25,35,50,65,80]
arr = np.array(Falha2_3)

```

```

for y in Y:
    B1 = []
    for i in f:
        B = (-arr[[y],[i],[3]])/(arr[[y],[i],[3]]**2 + arr[[y],[i],[2]]**2)
        B1.append(B)
    if y == 0:
        Bf2 = np.array(B1)
    else:
        B2 = np.array(B1)
        Bf2 = np.hstack([Bf2,B2])

```

Gráficos da Susceptância x Frequência

Baseline

```

H = np.r_[0:19001:1]
Y = np.r_[0:7:1]
Tm = np.r_[-10,4,24,36,52,64,80]
leg = ['-10 °C', '4 °C', '24 °C (Referência)', '36 °C', '52 °C', '64 °C', '80 °C']
clr = ['cyan', 'darkorange', 'black', 'blue', 'limegreen', 'red', 'violet']
lwdh = [1]*3 + [2]*3 + [3]*1
lsty = ['-', '-', '-']*2 + ['-']

```

```

a = 0
sus = []

fig = plt.figure(figsize=(13,8))
plt.grid()
plt.rcParams['xtick.labelsize'] = 20
plt.rcParams['ytick.labelsize'] = 20

for y in Y:
    for h in H:
        sus.append(Bb3[h][y])
    H1 = H + 1000

    plt.plot(H1,sus,label = leg[a],color = clr[a],lw = lwdh[a],ls = lsty[a])
    plt.legend(loc = 2, ncol = 2, prop = "size":16)
    plt.xlabel('Frequência [Hz]',fontsize = 24)
    plt.ylabel('Susceptância [ $\Omega^{-1}$ ]',fontsize = 24)
    a = a + 1
    sus = []
    plt.xlim([1000, 20000])

plt.show()
fig.savefig('Base_Sus.jpg',dpi = 300)

```

Falha 1

```

H = np.r_[0:19001:1]
Y = np.r_[0:7:1]
Tm = np.r_[-10,5,25,35,50,65,80]
leg = ['-10 °C','5 °C','25 °C','35 °C','50 °C','65 °C','80 °C']
clr = ['cyan','darkorange','saddlebrown','blue','limegreen','red','violet']
lwdh = [1]*3 + [2]*3 + [3]*1
lsty = ['-','-.-','-']*2 + ['-']
a = 0
sus = []

fig = plt.figure(figsize=(13,8))
plt.grid()

```

```

plt.rcParams['xtick.labelsize'] = 20
plt.rcParams['ytick.labelsize'] = 20

for y in Y:
    for h in H:
        sus.append(Bf1[h][y])
    H1 = H + 1000

    plt.plot(H1,sus,label = leg[a],color = clr[a],lw = lwdh[a],ls = lsty[a])
    plt.legend(loc = 2, ncol = 2, prop = "size":16)
    plt.xlabel('Frequência [Hz]',fontsize = 24)
    plt.ylabel('Susceptância [ $\Omega^{-1}$ ]',fontsize = 24)
    a = a + 1
    sus = []
    plt.xlim([1000, 20000])

plt.show()
fig.savefig('Falha1_Sus.jpg',dpi = 300)

```

Falha 2

```

H = np.r_[0:19001:1]
Y = np.r_[0:7:1]
Tm = np.r_[-10,5,25,35,50,65,80]
leg = ['-10 °C','5 °C','25 °C','35 °C','50 °C','65 °C','80 °C']
clr = ['cyan','darkorange','saddlebrown','blue','limegreen','red','violet']
lwdh = [1]*3 + [2]*3 + [3]*1
lsty = ['-','-.-','-']*2 + ['-']
a = 0
sus = []

fig = plt.figure(figsize=(13,8))
plt.grid()
plt.rcParams['xtick.labelsize'] = 20
plt.rcParams['ytick.labelsize'] = 20

```

```

for y in Y:
    for h in H:

```

```

        sus.append(Bf2[h][y])
    H1 = H + 1000

    plt.plot(H1,sus,label = leg[a],color = clr[a],lw = lwdh[a],ls = lsty[a])
    plt.legend(loc = 2, ncol = 2, prop = "size":16)
    plt.xlabel('Frequência [Hz]',fontsize = 24)
    plt.ylabel('Susceptância [\Omega^{-1}]',fontsize = 24)
    a = a + 1
    sus = []
    plt.xlim([1000, 20000])

plt.show()
fig.savefig('Falha2_Sus.jpg',dpi = 300)

```

Inclinação da susceptância x Temperatura

Baseline

```

H = np.r_[0:19001:1]
Y = np.r_[0:7:1]
Tm = np.r_[-10,4,24,36,52,64,80]
Ab3 = []
ab3 = []
bb3 = []

```

```

for y in Y:
    sus = []
    for h in H:
        sus.append(Bb3[h][y])
    H1 = H + 1000
    A = np.polyfit(H1, sus, 1)
    Ab3.append(A)

```

```

for y in Y:
    ab3.append(Ab3[y][0])
    bb3.append(Ab3[y][1])

```


Falha 1

```
H = np.r_[0:19001:1]
Y = np.r_[0:7:1]
Tm = np.r_[-10,5,25,35,50,65,80]
Af1 = []
af1 = []
bf1 = []
```

```
for y in Y:
    sus = []
    for h in H:
        sus.append(Bf1[h][y])
    H1 = H + 1000
    A = np.polyfit(H1, sus, 1)
    Af1.append(A)
```

```
for y in Y:
    af1.append(Af1[y][0])
    bf1.append(Af1[y][1])
```

Falha 2

```
H = np.r_[0:19001:1]
Y = np.r_[0:7:1]
Tm = np.r_[-10,5,25,35,50,65,80]
Af2 = []
af2 = []
bf2 = []
```

```
for y in Y:
    sus = []
    for h in H:
        sus.append(Bf2[h][y])
    H1 = H + 1000
    A = np.polyfit(H1, sus, 1)
    Af2.append(A)
```

```
for y in Y:
```

```
af2.append(Af2[y][0])
bf2.append(Af2[y][1])
```

Gráfico

```
H = np.r_[0:19001:1]
Y = np.r_[0:7:1]
Tm = np.r_[-10,5,25,35,50,65,80]
Tm2 = np.r_[-10,4,24,36,52,64,80] # Baseline

fig = plt.figure(figsize=(12,8))
plt.grid()
plt.rcParams['xtick.labelsize'] = 20
plt.rcParams['ytick.labelsize'] = 20

plt.plot(Tm2,ab3,label = 'Sem dano',color = 'black',lw = '1.5',ls = '-')
plt.plot(Tm,af13,label = 'Com falha 1',color = 'blue',lw = '2',ls = '-')
plt.plot(Tm,af23,label = 'Com falha 2 ',color = 'red',lw = '2.5',ls = '-')
plt.legend(loc = 2, ncol = 2, prop = "size":16)
plt.xlabel('Temperatura [°C]',fontsize = 24)
plt.ylabel('Inclinação da susceptância',fontsize = 24)

plt.show()
fig.savefig('Slope.jpg',dpi = 300)
```

Cálculo das retas médias, dos desvios e o gráfico final

Médias

```
Tm = np.r_[-10,4,24,36,52,64,80]
Eqb1 = np.polyfit(Tm, ab1, 1) # ab1 é obtido pelo mesmo processo para obter ab3,
# porém nesse caso utiliza-se os sinais de baseline para o aquecimento (Baseline1)
Eqb2 = np.polyfit(Tm, ab2, 1) # ab2 é obtido pelo mesmo processo para obter ab3,
# porém nesse caso utiliza-se os sinais de baseline para o resfriamento (Baseline2)
Eqb3 = np.polyfit(Tm, ab3, 1)
```

Limites

```
dpa1 = (Eqb1[0] - Eqb3[0])**2
dpa2 = (Eqb2[0] - Eqb3[0])**2
dpb1 = (Eqb1[1] - Eqb3[1])**2
dpb2 = (Eqb2[1] - Eqb3[1])**2
```

```
dpa = mt.sqrt((dpa1 + dpa2)/2)
dpb = mt.sqrt((dpb1 + dpb2)/2)
```

Gráfico

```
H = np.r_[0:19001:1]
Y = np.r_[0:7:1]
Tm = np.r_[-10,5,25,35,50,65,80]
Tm2 = np.r_[-10,4,24,36,52,64,80] # Baseline
mediab = []
mediaf1 = []
mediaf2 = []
high1 = []
low1 = []
high2 = []
low2 = []
high3 = []
low3 = []
```

```
fig = plt.figure(figsize=(12,8))
plt.grid()
plt.rcParams['xtick.labelsize'] = 20
plt.rcParams['ytick.labelsize'] = 20
```

```
for T in Tm2:
    mediab.append(Eqb3[0]*T + Eqb3[1])
```

```
for T in Tm2:
    high1.append((Eqb3[0]+1*dpa)*T + (Eqb3[1]+1*dpb)) # Limite superior para n = 1
```

```
for T in Tm2:
    low1.append((Eqb3[0]-1*dpa)*T + (Eqb3[1]-1*dpb)) # Limite inferior para n = 1
```

```

for T in Tm2:
    high2.append((Eqb3[0]+2*dpa)*T + (Eqb3[1]+2*dpb)) # Limite superior para n = 2

for T in Tm2:
    low2.append((Eqb3[0]-2*dpa)*T + (Eqb3[1]-2*dpb)) # Limite inferior para n = 2

for T in Tm2:
    high3.append((Eqb3[0]+3*dpa)*T + (Eqb3[1]+3*dpb)) # Limite superior para n = 3

for T in Tm2:
    low3.append((Eqb3[0]-3*dpa)*T + (Eqb3[1]-3*dpb)) # Limite inferior para n = 3

plt.plot(Tm2,mediab,label = 'Média',color = 'black',lw = '3',ls = '-')
plt.plot(Tm2,high3,label = 'S_high',color = 'indigo',lw = '3.5',ls = '-')
plt.plot(Tm2,low3,label = 'S_low',color = 'gold',lw = '3.5',ls = '-')
plt.plot(Tm,af13,label = 'Com falha 1',color = 'blue',lw = '2',ls = '-')
plt.plot(Tm,af23,label = 'Com falha 2',color = 'red',lw = '2.5',ls = '-')
plt.legend(loc = 2, ncol = 2, prop = "size":16)
plt.xlabel('Temperatura [°C]',fontsize = 24)
plt.ylabel('Inclinação da susceptância',fontsize = 24)

plt.show()
fig.savefig('Slope_Limites3.jpg',dpi = 300)

```