

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA "JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
FACULDADE DE ENGENHARIA DE BAURU

JOHN DAVID VENÂNCIO

**SISTEMAS ALTERNATIVOS DE MEDIÇÃO DE IMPEDÂNCIA DE
TRANSDUTORES PIEZELÉTRICOS PARA SISTEMAS DE MONITORAMENTO
DE INTEGRIDADE ESTRUTURAL.**

BAURU
2022

JOHN DAVID VENÂNCIO

**SISTEMAS ALTERNATIVOS DE MEDIÇÃO DE IMPEDÂNCIA DE
TRANSDUTORES PIEZELÉTRICOS PARA SISTEMAS DE MONITORAMENTO
DE INTEGRIDADE ESTRUTURAL.**

Trabalho de conclusão de curso apresentado
como requisito para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Elétrica.
Universidade Estadual Paulista "Júlio de
Mesquita Filho"

Orientador: Prof. Dr. Fabrício Guimarães
Baptista

V448s

Venâncio, John David

Sistemas alternativos de medição de impedância de trasdutores piezelétricos para sistema de monitoramento de integridade estrutural / John David

Venâncio. -- Bauru, 2022

59 f.

Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado - Engenharia Elétrica) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Faculdade de Engenharia, Bauru

Orientador: Fabrício Guimarães Baptista

1. SHM. 2. Impedância eletromecânica. 3. Transdutores piezelétricos. 4. Impedância elétrica. 5. Estruturas inteligentes. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca da Faculdade de Engenharia, Bauru. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

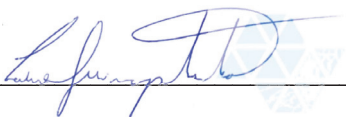
FOLHA DE APROVAÇÃO

Aluno: **John David Venâncio**

Título: **Sistemas Alternativos de Medição de Impedância para Monitoramento de Integridade Estrutural**

Trabalho de Graduação defendido e aprovado em 16/12/2022, com

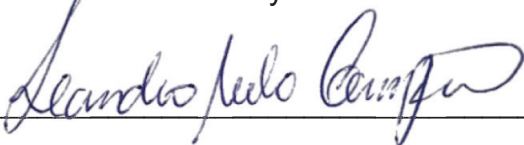
MÉDIA: 10.0 (Dez), pela comissão julgadora:



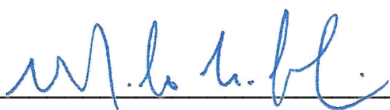
Prof. Dr. Fabricio Guimarães Baptista



Prof. Dr. Danilo Ecidir Budoya



Prof. Dr. Leandro Melo Campeiro



Prof. Dr. Marcelo Nicoletti Franchin
Coordenador do Curso de Graduação em
Engenharia Elétrica

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus pela força que tem me dado na graduação e na vida.

A minha família, e dedico aos meus pais todo o sucesso que posso vir a obter na vida profissional e pessoal.

Agradeço ao professor Fabrício pela paciência e disponibilidade em me ajudar a realizar e concluir o presente trabalho.

E a UNESP por, praticamente, ter sido meu lar por muitos anos desde o colégio técnico, cursinho pré-vestibular e graduação.

“Houve um tempo em que o homem enfrentou o universo sozinho e sem amigos. Agora ele tem criaturas para ajudá-lo; criaturas mais fortes que ele próprio, mais fiéis, mais úteis e totalmente devotadas a ele. A humanidade não está mais sozinha.”

Isaac Asimov, *Eu, Robô*

Resumo

Os sistemas de monitoramento de integridade estrutural têm sido estudados nos meios acadêmicos, pois podem proporcionar uma maior confiabilidade para a integridade de estruturas dos mais variados tipos. Estudos alternativos de elaboração de sistemas de monitoramento de integridade estrutural têm sido planejados desde os anos 70, sendo o foco deste estudo a medição da impedância de sensores piezelétricos que tem proporcionado avanços na área de monitoramento de integridade estrutural. Logo, o presente trabalho tem como objetivo a elaboração de uma revisão bibliográfica sobre sistemas alternativos de medição de impedância de sensores piezelétricos para sistemas de monitoramento estrutural, tendo como metodologia, o levantamento de contribuições sobre o assunto e experimentos na área.

Palavras-Chave: SHM, Impedância eletromecânica, Transdutores piezelétricos, Impedância elétrica, Analisador de impedância, Estruturas inteligentes.

Abstract

Over time, structural health monitoring systems have been studied in academic circles, as they can provide greater reliability for the health of structures of the most varied types. Alternative studies on the development of structural health monitoring systems have been planned since the 1970s, with the focus of this study being the measurement of impedance of piezoelectric sensors that has provided advances in the area of structural health monitoring. Therefore, the present work aims to elaborate a bibliographic review on alternative impedance measurement systems of piezoelectric sensors for structural monitoring systems, having as methodology, the survey of contributions on the subject and experiments in the area.

Keywords: SHM, Electromechanical impedance, Piezoelectric transducers, Electrical impedance, Impedance analyzer, Smart structures.

Lista de Figuras

- 1.1. Passos a serem seguidos para monitoramento de integridade estrutural.
- 1.2. Árvore da evolução dos materiais ferroelétricos Ribeiro *et al.* (2018).
- 1.3. Representação de material piezelétrico através de um capacitor de placas paralelas Baptista (2010).
- 1.4. Modos de operação do transdutor piezelétrico Ramadan *et al.* (2014).
- 1.5. Polarização de Sensor Piezelétrico: Polarização Corona e Polarização por Eletrodo Ramadan *et al.* (2014).
- 1.6. Transdutor piezelétrico em forma de disco. (<https://www.theremino.com>).
- 1.7. Constituição transdutor MPC Eaton, M *et al.* (2009).
- 1.8 Transdutor AFC Kornmann, X. *et al.* (2004)
- 1.9. Representação genérica de um sistema de impedância E/M Liang *et al.* (1996 p.3)
- 1.10. Comparação entre resistência elétrica de um PZT livre vs PZT colado Baptista (2010).
- 3.1. Medidor HP4194 ligado a um computador Rugina *et al.* (2015).
- 3.2. Placas experimentais com transdutor piezelétrico Rugina *et al.* (2015).
- 3.3. Placa de camadas de sensores piezelétricos Qing *et al.* (2019).
- 3.4. instalação dos sensores na estrutura da aeronave Qing *et al.* (2019).
- 3.5. Sistema SHM integrado à aeronave Qing *et al.* (2019).
- 3.6 Rede de sensores proposta Qing *et al.* (2019).
- 3.7 Lógica para detecção de danos aos sensores Qing *et al.* (2019).
- 3.8 Fluxograma para utilização de estratégia evolutiva em SHM.
- 3.9 Viga discretizada utilizada nos experimentos.
- 3.10 Danos estruturais: Caso 1 Tebaldi *et al.* (2006).
- 3.11 Danos estruturais: Caso 2 Tebaldi *et al.* (2006).
- 3.12. Topologia proposta por Baptista (2009) para medição de impedância.
- 3.13. Circuito auxiliar de excitação do PZT.
- 3.14. Comparação entre o HP4192A e o sistema proposto.
- 3.15. Protótipo do sistema proposto por Finzi Neto *et al.* (2010).
- 3.16. Topologia Híbrida proposta por Finzi Neto *et al.* (2010).
- 3.17. Comparação entre HP4194A e o protótipo híbrido.
- 3.18. Topologia genérica proposta por Kim *et al.* (2009).
- 3.19. Circuito proposto por Kim *et al.* (2009).
- 3.20. Sensores conectados á estrutura.

- 3.21. Localização dos sensores PZT.
- 3.22. DAQ Utilizado por Martowicz *et al.* (2015).
- 3.23. Sistema Proposto por Na e Park (2017) para Experimento.
- 3.24. Gráfico de análise.
- 3.25. Primeiro módulo proposto por Overly *et al.*
- 3.26. Módulo proposto por Overly *et al.*
- 3.27. Estrutura experimental.
- 3.28. Topologia proposta por Park *et al.* (2008).
- 3.29. Métricas analisadas por Park *et al.* (2008).
- 3.30. Sistema proposto por Peairs *et al.*
- 3.31. Figura 3.31. Comparação entre o sistema proposto por Peairs *et al.* e um tradicional.
- 3.32. Topologia Proposta por Shirui Wang e Chao You (2008).
- 3.33. Montagem experimental em blocos.
- 3.34. Resultados para superfície de alumínio.
- 3.35. Resultados para superfície de madeira.
- 3.36. Sensores avaliados por Silva de Freitas e Guimarães Baptista. (2015).
- 3.37. Resultado da comparação entre um sensor convencional e o 7BB-20-6.
- 3.38. Resultado da comparação entre diversos sensores mostrados na Figura 3.31.
- 3.39. Comparação final entre um sensor tradicional e o 7BB-20-6.
- 3.40. Sistema proposto por Buli e Giurgiutiu (2005).
- 3.41. Resultados encontrados por Buli e Giurgiutiu (2005).

Lista de Siglas e Abreviaturas

1D	Uma dimensão
ADC	Analog to Digital Converter - Conversor Analógico-Digital
CCDM	Correlation Coefficient Deviation Metric – Desvio do coeficiente de correlação
DAC	Digital to Analog Converter - Conversor Digital-Analógico
COV	Covariance – Covariância
DAQ	Data Acquisition – Dispositivo de aquisição de dados
DSP	Digital Signal Processor – Processador digital de sinais
DFT	Discrete Fourier Transform – Transformada de Fourier discreta
E/M	Eletromecânica
FPGA	Field Programmable Gate Array – Matriz de Portas Programáveis
FFT	Fast Fourier Transform – Transformada rápida de Fourier
FRF	Função de Resposta em Frequência – Frequency Response Function
GPIB	General Purpose Interface Bus – Barramento de interface de uso geral.
LabVIEW	Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench
NDE	Non-Destructive Evaluation – Avaliação não destrutiva
PC	Personal Computer – Computador pessoal
PCA	Principal Component Analysis – Análise de Componente Principal
PSD	Power Spectral Density – Densidade Espectral de Energia
PSO	Particle Swarm Optimization – Otimização por nuvem de partículas
PZT	Pb-Lead Zirconate Titanate – Titanato zirconato de chumbo
RMSD	Root Mean Square Deviation – Desvio da raiz média quadrática
SHM	Structural Health Monitoring – Monitoramento de integridade estrutural
SSCS	Switching and Signal Conditioning System – Sistema de condicionamento de sinal e chaveamento.
USB	Universal Serial Bus – Barramento serial universal.

SUMÁRIO

1	Introdução.....	1
1.1	Sistemas SHM.....	1
1.2	O Efeito Piezelétrico.....	3
1.2.1	Sensores Piezelétricos.....	5
1.3	Técnica de Impedância E/M.....	8
1.4	Justificativa.....	11
1.5	Materiais e Métodos.....	11
2	Resultados Esperados.....	12
3	Sistemas alternativos para medição de impedância de transdutores piezelétricos.....	12
3.1	Introdução.....	12
3.2	Sistemas de Alto Custo.....	13
3.3	Sistemas de Baixo Custo.....	22
4	Considerações Finais.....	40
5	Referências Bibliográficas.....	41

1 Introdução

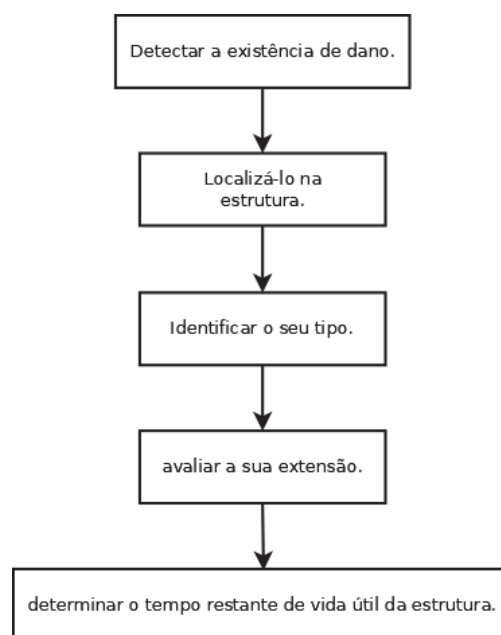
Os Sistemas de monitoramento de integridade estrutural, do inglês, *Structural health monitoring* ou SHM, são sistemas que possuem a finalidade de monitorar estruturas, e detectar danos estruturais que podem ser detectados e avaliados em tempo real. O presente trabalho será a realização de uma revisão bibliográfica de estudos alternativos de medição de impedância de sensores piezelétricos aplicados aos sistemas de integridade estrutural, analisando contribuições de diversos autores que tratem do presente tema.

1.1 Sistemas de SHM

Os sistemas de SHM são sistemas que visam a análise de danos estruturais, em estruturas civis como pontes e prédios, estruturas Automobilísticas, Marítimas, Aeroespaciais e Aeronáuticas como aviões e foguetes, e seu embasamento de necessidade é que determinadas falhas em diversos tipos de estruturas podem ocasionar perdas financeiras elevadas, portanto, analisar falhas estruturais é substancial para a sociedade.

Segundo Rytter, 1993 (*apud* Baptista 2010, p.16), há um processo de cinco passos a ser seguido para avaliação de um sistema SHM: (1) detectar a existência de dano; (2) localizá-lo na estrutura; (3) identificar o seu tipo; (4) avaliar a sua extensão; (5) determinar o tempo restante de vida útil da estrutura.

Figura 1.1. Passos a ser seguidos para monitoramento de integridade estrutural.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Esses sistemas SHM que serão estudados neste trabalho se utilizam de transdutores piezelétricos e medição de sua impedância ao aplicar um sinal de varredura no sistema. Ao medir a variação da impedância do sensor, é possível verificar a existência de danos estruturais onde o sistema for aplicado.

Portanto, há uma necessidade de estudar e produzir sistemas de SHM com transdutores piezelétricos que possuam um baixo custo em sua produção, e que tenha boa confiabilidade em medir os danos estruturais.

De acordo com Sohn *et al.* (1996), o processo de monitoramento da integridade estrutural se baseia em 4 pilares, onde cada pilar corresponde a princípios que norteiam a análise de danos em estruturas. Os pilares são apresentados abaixo:

- 1-Validação operacional.
- 2-Aquisição de Dados, associados entre si e claros.
- 3-extração de características e condensação da informação.
- 4-desenvolvimento de modelo estatístico para exibição de características.

Cada um desses pilares corresponde a princípios que norteiam a análise de danos em estrutura, segundo Sohn *et al.* (1996).

A validação operacional corresponde a certeza que os dados encontrados correspondem a um dano estrutural.

A aquisição de dados é importante que seja feita de forma concisa para com a estrutura analisada e os dados obtidos através dos sensores não tenham erros, para isso é necessário que seja realizada a medição da impedância da estrutura sem danos, e compará-la com o valor advindo dos danos estruturais, lida pelo sensor.

A extração de características da estrutura basicamente corresponde a levantar dados que descrevam as características iniciais da estrutura, e em caso de danos, venham a ser comparados via modelos estatísticos que corroborem e afirmem que há um dano estrutural.

Portanto conseguir realizar a aquisição dos dados de forma precisa é um requisito básico para a operação dos SHM.

Segundo Farrar, Charles R e Worden, K (2007), e discutido por Rytter (1993), um sistema de SHM deve responder as seguintes perguntas:

- 1-Existência – Existe dano na estrutura?
- 2-Localização – Onde se encontra o dano?
- 3-Tipo – Qual tipo de dano ocorreu?
- 4-Extensão – Quão grave foi o dano?
- 5-Prognóstico – Quanto tempo de vida útil resta à estrutura?

Ao responder essas perguntas, é possível avaliar o dano e conhecer a sua gravidade, portanto, estudar os sistemas de SHM é uma atividade interdisciplinar que envolve além da própria engenharia da estrutura, a avaliação de dados que descrevem a sua integridade.

1.2 O Efeito Piezelétrico

A seguir, será elaborada uma explicação sucinta sobre o efeito piezelétrico e como é possível aplicá-lo em sistemas de SHM.

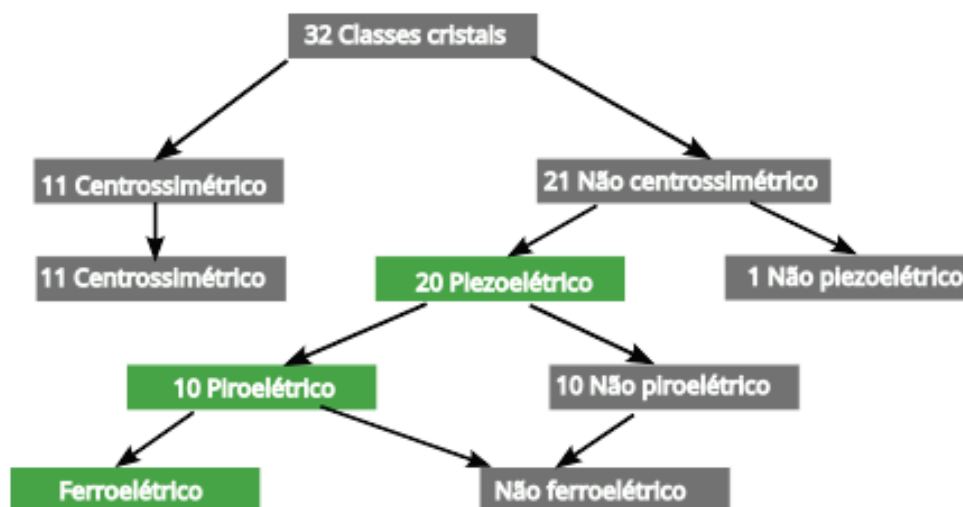
O efeito piezelétrico é casado com o estudo da cristalografia, que é a ciência que estuda a disposição dos átomos nas estruturas de um determinado material.

Historicamente, segundo RIBEIRO *et al.* (2018), o início do estudo dos materiais piezelétricos se deu com o material conhecido como Fluoreto de polivinilideno ou PVDF que ocorreu nos anos 60 e tem evoluído até a pesquisa do Titanato zirconato de chumbo ou PZT que é muito utilizado em sistemas SHM devido ao baixo custo e a sua eficiência.

Resumindo, “O efeito consiste basicamente na conversão de energia mecânica em elétrica. Posteriormente, em 1881, por análises termodinâmicas, Lippman previu a existência do “efeito piezoelétrico inverso”, que consiste no aparecimento de uma deformação do material quando submetido a um campo elétrico.” (FREITAS, Ricardo Luiz Barros de, 2012, p25).

Os materiais piezelétricos possuem propriedades ferroelétricas, e a figura seguinte mostra sua evolução.

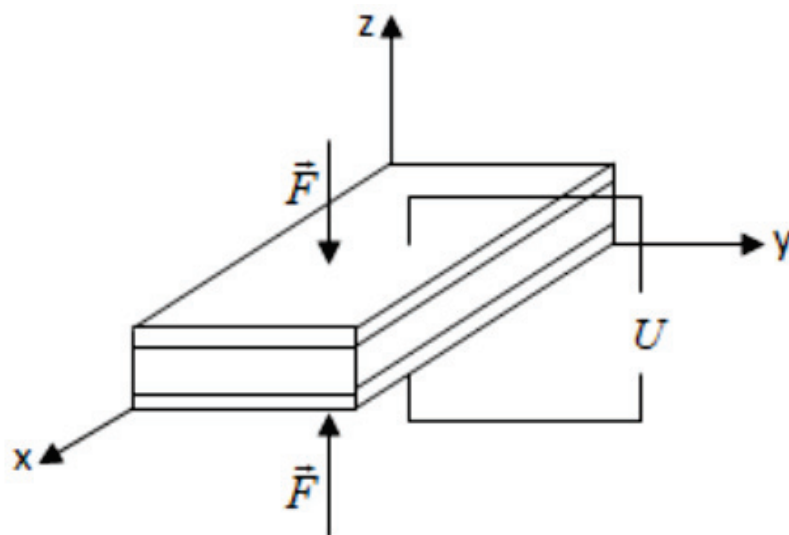
Figura 1.2. Árvore da evolução dos materiais ferroelétricos.



Fonte: Adaptado de Ribeiro *et al.* (2018).

Logo, por materiais piezelétricos serem ferroelétricos, possuem dipolos elétricos em sua concepção, e um modelo simples de visualizar a sua forma é através de um modelo de capacitor de placas paralelas, como apresentado na Figura 1.3.

Figura 1.3. Representação de material piezelétrico através de um capacitor de placas paralelas.



Fonte: Baptista (2010), p.22.

De acordo com esse modelo, ao ocorrer uma força F sobre o corpo do material piezelétrico, o material se deforma e surge uma tensão U que representa uma diferença de potencial elétrica que pode ter várias aplicações, sendo o inverso também verdadeiro como mencionado anteriormente por Freitas, Ricardo Luiz Barros de. (2012, p25.).

Materiais piezelétricos possuem inúmeras aplicações, como transdutores acústicos (usados em alarmes), sensores de SHM e outras.

No caso de sensores de SHM, uma aplicação advinda do efeito piezelétrico é a existência de impedâncias, podendo ser mecânica e elétrica, e é possível mensurar ambas e utilizar de suas medições para várias aplicações, restringindo o presente trabalho a aplicações que envolvam alternativas a medição de impedância para aplicação em sistemas de SHM, com a aplicação desses materiais como sensores, sendo explanada na seção posterior.

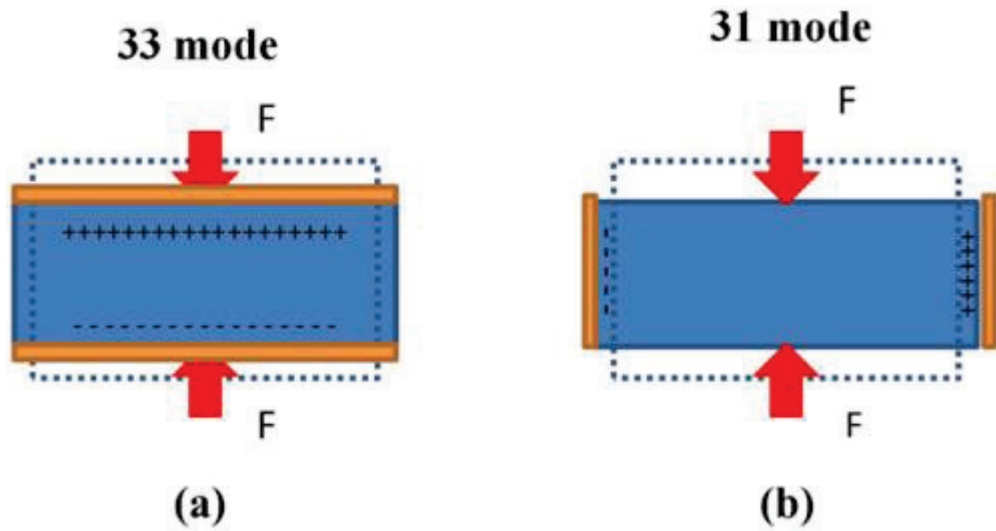
A análise tensorial que demonstra o efeito piezelétrico não será descrita neste trabalho.

Ao analisar o transdutor piezelétrico e seu efeito como mencionado acima, ocorre que uma impedância mecânica pode ser mensurada devido ao esforço ocorrido em seu corpo e uma impedância elétrica, que é ocasionada devido ao aparecimento da diferença de potencial e uma corrente elétrica que circula por condutores ligados ao material, possibilitando um estudo de técnicas de análise de impedância E/M. Na seção a seguir, uma explicação sobre sensores piezelétricos, mostrando como esses materiais se comportam e alguns tipos de sensores desenvolvidos.

1.2.1 Sensores Piezelétricos

De acordo com Ramadan *et al.* (2014), os sensores piezelétricos operam pelo princípio da piezoeletricidade, que é uma consequência direta do efeito piezelétrico, visto na seção anterior. Esse efeito da piezoeletricidade ocorre quando um campo elétrico é colocado no material, causando uma deformação mecânica no mesmo, e o oposto também ocorre, sendo esse efeito reversível. Através de um desenvolvimento tensorial, que não será discutido no trabalho, resulta-se em dois tipos de modos de operação de um sensor (ou transdutor) piezelétrico, sendo esses modos o modo 33 e o modo 31, que são modos de distinguir a forma de transdução do sensor. O que os difere basicamente é a forma de distribuição do campo elétrico quando o sensor é excitado, conforme mostra a Figura 1.4.

Figura 1.4. Modos de operação do transdutor piezelétrico.

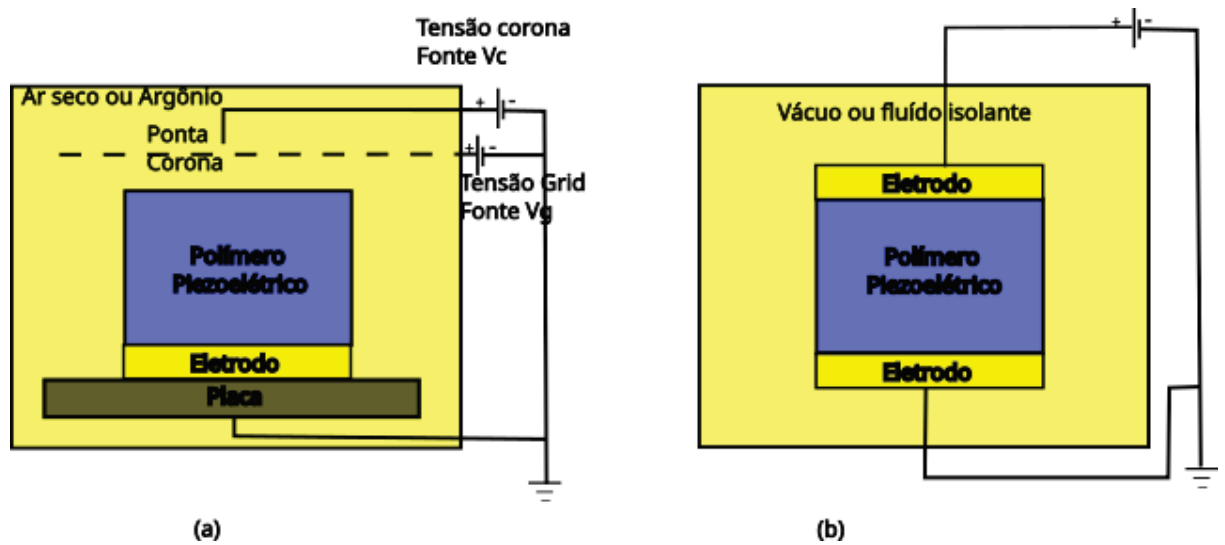


Fonte: Ramadan *et al.* (2014).

Existem diferentes tipos de materiais que são considerados piezelétricos, como os materiais que são polimerizados em massa, que possuem uma mudança na estrutura molecular, materiais poliméricos compostos, e os polímeros de carga anulada ou *voided charged polymer*. O sinal elétrico que excita o sensor pode ser AC ou DC, porém para a aplicação em sistemas SHM, o interessante é a variação do sinal ao variar a carga mecânica sobre o sensor.

Há duas formas de se polarizar um sensor piezelétrico, sendo um o modo corona e o outro o modo de polarização por eletrodo. O modo de polarização corona envolve apenas um eletrodo ligado ao material piezelétrico ligado em uma chapa e o modo por eletrodo envolve dois eletrodos, como apresentado na figura a seguir.

Figura 1.5. Polarização de Sensor Piezelétrico: Polarização Corona e Polarização por Eletrodo.



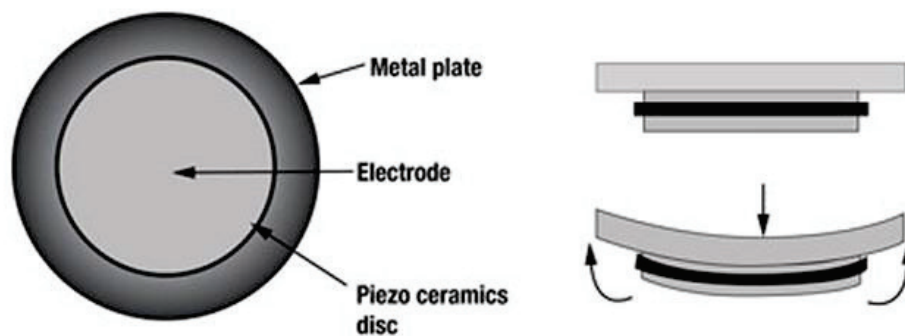
Fonte: Adaptado de Ramadan *et al.* (2014)

Existem diversos tipos de materiais piezoelétricos como o PVDF, PZT e os ZnO, porém dentre os sensores que utilizam esse tipo de material, o mais comumente usado em SHM é o PZT.

Os sensores piezoelétricos quando aplicados em sistemas de SHM são transdutores ativos, já que eles irão mudar o sinal elétrico de acordo com a excitação mecânica que sofrem.

Alguns sensores piezoelétricos muito utilizados em pesquisas são a pastilha piezoelétrica, como a da figura 1.6, em conjunto com a sua constituição. Esse transdutor possui muitas funções, como detecção de danos em sistemas SHM, buzzers, entre outros usos, a depender da topologia de onde será aplicado.

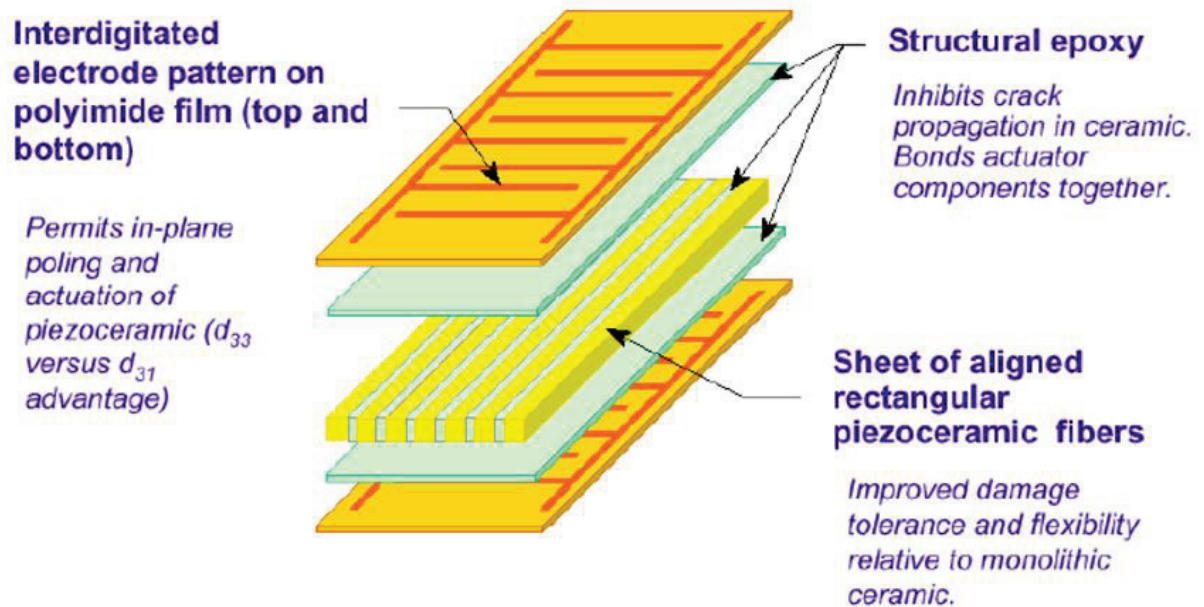
Figura 1.6: Transdutor piezoelétrico em forma de disco.



Fonte: <https://www.theremino.com>

Outro tipo de transdutor muito utilizado é o MFC (*Macro Fiber Composite*).

Figura 1.7. Constituição transdutor MPC



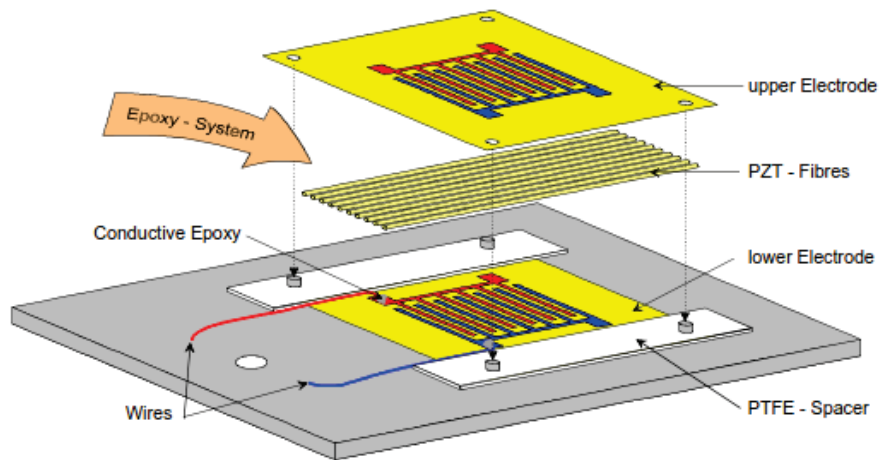
Fonte: Eaton, M. *et al.* (2009).

De acordo com Eaton *et al.* (2009), esse tipo de transdutor é muito utilizado como sensor de emissão acústica, devido a sua montagem, em camadas e laminar, tendo como foco, aplicação em sistemas aeroespaciais.

Logo, esse tipo de sensor é conveniente para análise de danos estruturais em frequência entre 30 a 100 kHz, segundo Eaton *et al.* (2009).

Existe também o AFC (*Active Fiber Composite*), que é um transdutor também montado sobre camadas, mostrado na Figura 1.8.

Figura 1.8. Transdutor AFC.



Fonte: Kornmann, X. *et al.* (2004).

O AFC também é utilizado para sensor em SHM e possui utilidade como sensor de emissão acústica.

Ele foi desenvolvido na pesquisa de Kornmann, X. *et al.* (2004), utilizando um analisador de impedância HP4194. Ele possui um alcance de 100 Hz a 300 kHz em frequência. De agora em diante, no trabalho, os transdutores piezelétricos serão denominados sensores que podem ser PZT, MFC, entre outros.

Na próxima seção, será apresentada uma forma de se obter análise de sinais desses transdutores (ou sensores) utilizando a Técnica da Impedância E/M.

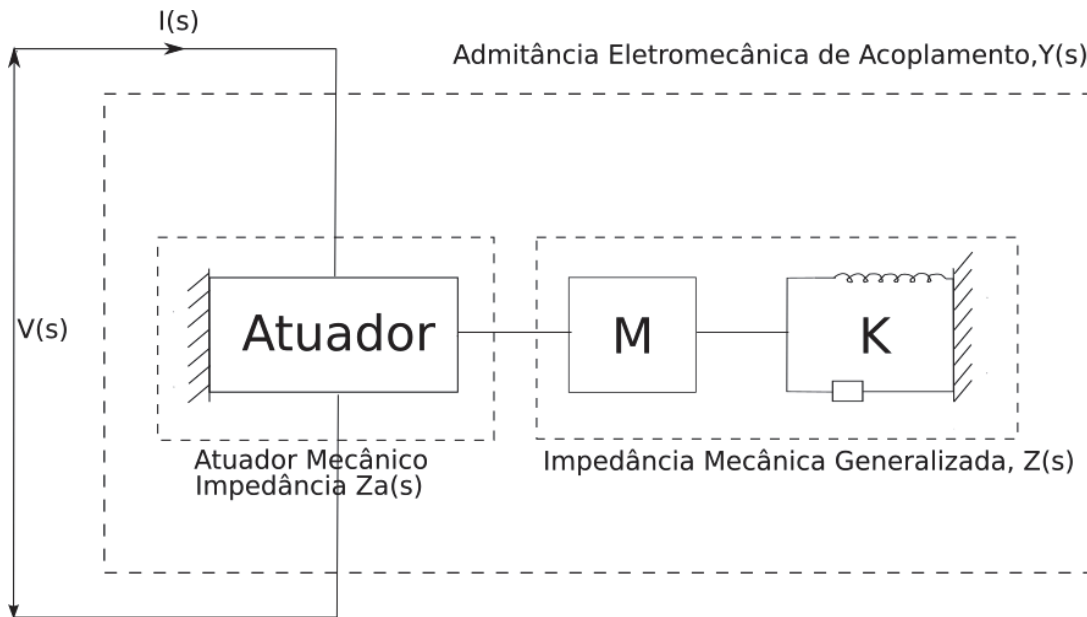
1.3 Técnica da Impedância E/M

A técnica da impedância E/M é uma técnica de NDE (Avaliação Não Destrutiva) que é baseada em FRF (Função de Resposta em Frequência) que possui como objetivo a medição da impedância mecânica de uma estrutura, sendo medida por um transdutor piezelétrico, normalmente elaborado com PZT que possuem baixo custo e boa eficácia.

Devido ao efeito piezelétrico que foi resumido na seção anterior, é possível mensurar as propriedades mecânicas da estrutura a ser avaliada por um sistema SHM pela impedância elétrica do transdutor, necessitando que o transdutor seja acoplado (ou colado) na estrutura a ser avaliada pelo sistema.

Portanto, “é comum na literatura atribuir às cerâmicas de PZT as funções de sensor (efeito piezelétrico direto) e de atuador (efeito piezelétrico reverso).” (BAPTISTA, 2010). De acordo com Liang *et al.* (1996 p.3), um sistema de impedância E/M pode ser observado como um sistema massa-mola, como segue na figura abaixo.

Figura 1.9. Representação genérica de um sistema de impedância E/M.



Fonte: Adaptado de Baptista (2010).

Explicando esse sistema genérico, ‘m’ é a massa do sistema e ‘K’ a constante elástica da mola. $I(s)$ é a corrente elétrica e $V(s)$ é a tensão, sendo exemplificados no diagrama que o sistema está no domínio S de Laplace, que ao ser convertido no tempo, resulta em um sinal senoidal. Explicando resumidamente, o atuador recebe uma tensão mecânica que ocorre na estrutura analisada, e essa tensão mecânica é convertida em uma impedância elétrica.

De acordo com Liang *et al.* (1994) e mencionado por Wongi e Baek (2018), como admitância (Y), a relação entre a impedância elétrica e mecânica segue abaixo:

$$Y(\omega) = i\omega a \left(\varepsilon_{33}^t (1 - i\delta) - \frac{Z_{s(\omega)}}{Z_{s(\omega)} + Z_{a(\omega)}} d_{3x}^2 Y_{xx}^{-E} \right) \quad (1.1)$$

Onde ω , a , ε_{33}^t , d_{3x}^2 , Y_{xx}^{-E} representa frequência de entrada, constante geométrica, constante dielétrica, tangente de perda, constante de acoplamento e módulo de Young respectivamente.

Logo, uma mudança na impedância mecânica da estrutura, altera-se a impedância elétrica do transdutor, e em suma, a técnica da impedância E/M permite mensurar a integridade física da estrutura por meio da impedância elétrica de uma forma simples, necessitando que o transdutor seja ligado a um elemento que forneça frequência na casa dos kHz, variável, permitindo que o transdutor reconheça uma avaria na estrutura, podendo ser um sinal do tipo *chirp* alimentando o sistema SHM, pois esse tipo de sinal pode ter frequência variável, logo a admitância pode ser vista como a resposta em frequência do sistema segundo Liang *et al.* (1995).

Porém, apenas acoplar o transdutor a uma fonte de frequência não é o suficiente para mensurar danos em uma estrutura. É necessário que o sistema possua uma forma de cálculo estatístico para mensurar se ocorreu uma falha no sistema e de acordo com Baptista (2010) e corroborado por Wongi e Baek (2018), uma forma de se avaliar os danos é com a métrica RMSD (1.2) (Desvio da raiz média quadrática), e a métrica CCMD (1.3) (Desvio do Coeficiente de Correlação) que será explanada a forma de utilização nos sistemas SHM na seção sobre sistemas alternativos, sendo $Z_{n,d}$ impedância medida com a estrutura íntegra e $Z_{n,h}$ a impedância medida com a estrutura danificada.

$$RMSD = \sum_n^N \sqrt{\frac{(Z_{n,d} - Z_{n,h})^2}{Z_{n,h}^2}} \quad (1.2)$$

E o CCMD é calculado por:

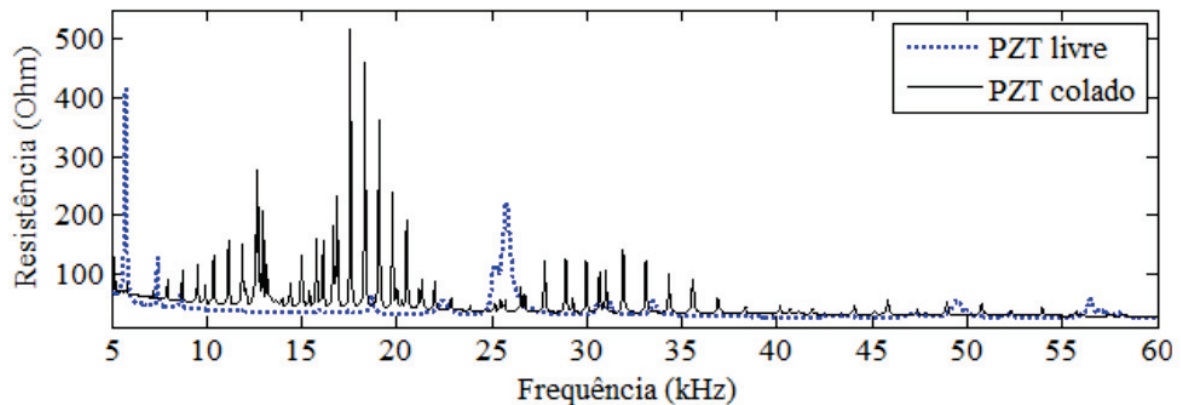
$$CCMD = 1 - \left| \frac{\sum_n^N (Z_{n,h} - \bar{Z}_h)(Z_{n,d} - \bar{Z}_d)}{\sum_n^N \sqrt{(Z_{n,d} - \bar{Z}_n)^2 (Z_{n,d} - \bar{Z}_d)^2}} \right| \quad (1.3)$$

Onde o Z_n é o valor da impedância natural médio, e Z_d o valor da impedância com a estrutura danificada médio.

Para utilização desta técnica, é importante medir a frequência natural da estrutura para não ocorrer erros que possam interferir no funcionamento do sistema SHM.

Em experimento, Baptista (2010) comparou as frequências analisadas pelo PZT livre e colado, e foi percebido que o PZT livre tem picos em várias frequências, que quando colados à estrutura, possibilita a leitura de várias frequências.

Figura 1.10. Comparação entre resistência elétrica de um PZT livre vs PZT colado.



Fonte: Baptista (2010).

1.4 Justificativa

A justificativa principal para o projeto é analisar as diversas bibliografias elaboradas por vários pesquisadores a respeito de sistemas alternativos de medição de impedância E/M(eletromecânica) aplicadas a detecção de danos estruturais, realizando uma revisão bibliográfica das diversas pesquisas do tema, sendo o presente trabalho, a conclusão do estudo.

1.5 Materiais e métodos

Os materiais utilizados na pesquisa foram obtidos após levantamento bibliográfico no google acadêmico, no IEEEExplore.

O presente trabalho será a realização de um projeto de revisão bibliográfica de estudos alternativos de medição de impedância de sensores piezelétricos aplicados aos sistemas de integridade estrutural, analisando contribuições de diversos autores que tratem do presente tema, levantando bibliografias acerca do tema.

2 Resultados Esperados

Os resultados esperados são o levantamento da bibliografia científica levantada e sua revisão, tendo como princípio, uma pesquisa acerca das técnicas de medição de impedância eletromecânica aplicada em estruturas dos mais diversos tipos, analisando diferentes técnicas de implementação de sistemas SHM.

3 Sistemas alternativos para medição de impedância de transdutores piezelétricos

3.1 Introdução

Muitos sistemas alternativos de medição de impedância têm sido estudados e muito avanço tem sido realizado na área, e realizamos no presente item uma análise de diversos sistemas alternativos de medição de impedância estudados, fazendo revisão das bibliografias encontradas.

O intuito desta introdução é explicar alguns conceitos, como FFT, DFT, RMSD e CCMD.

A FFT (Transformada Rápida de Fourier) é um algoritmo que visa calcular e mensurar a frequência e a amplitude presentes em um dado sinal. Por ser um algoritmo numérico, é possível analisar por um software de cálculo numérico, as grandezas mencionadas, podendo até mesmo ser um software livre.

A DFT (Transformada Discreta de Fourier) é uma forma de analisar um sinal discreto em termos de sua frequência e amplitude da mesma, operando de forma similar a FFT, porém com a diferença que a DFT é utilizada em sinais discretos.

RMSD (1.2) e CCMD (1.3) são cálculos estatísticos aplicados a análise de sinais que permite obter uma interpretação de como está a integridade da estrutura, no caso serão vistas formas de se medir variação na impedância dos transdutores aplicados à estruturas, podendo esses cálculos serem o elemento que atesta o dano estrutural.

As pesquisas atuais estão tendenciando a desenvolver sistemas e configurações que reduzam o custo final do sistema SHM aplicando a técnica da impedância E/M, logo haverá um foco maior nessa área na presente seção. Também, a seguir, abordaremos alguns sistemas que não possuem custo menor, porém são relevantes por terem sido avanços na área.

Posteriormente, aparecerão outras métricas de cálculo utilizadas nos sistemas, que serão explicadas na própria seção em que se situa.

3.2 Sistemas de alto custo

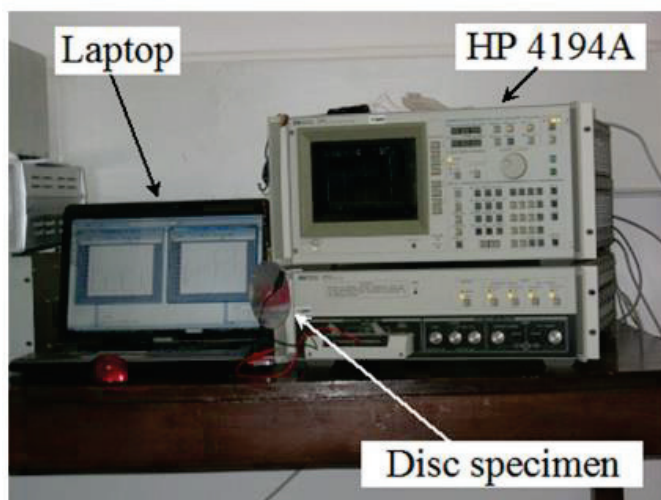
Os sistemas de alto custo foram pioneiros em pesquisas e implementações em estruturas que possuem alto custo, como aeronaves que veremos nesta seção. Esses sistemas costumam utilizar analisadores de impedância, e por serem volumosos e caros, não é possível implementar sistemas SHM de forma comercial em qualquer estrutura. Todas as topologias de sistemas SHM aqui vistas, tem o mesmo princípio básico de utilizar a técnica da impedância E/M, a FRF e sistemas aquisidores de sinal (DAQ).

Medidor HP4194A

Um bom sistema para iniciar o estudo seria o proposto por Rugina *et al.* (2015) que fez um experimento comparando um medidor HP4194A que é um analisador de impedância de valor elevado mais utilizado no meio acadêmico ligado a um PC e dispositivos piezelétricos, com um equipamento que se utiliza de vibrações mecânicas em alta frequência que utiliza efeito doppler (que não será estudado neste trabalho). O HP4194 quando conectado a um transdutor piezelétrico ou ligado a uma estrutura, aplica-se um sinal senoidal fixo e mede-se a amplitude da tensão, corrente e também a fase, obtendo a impedância medida pelo equipamento, porém esse equipamento também permite fazer uma varredura de frequências. O equipamento também permite obter a parte real e imaginária da impedância, porém, neste trabalho, apenas a parte real é necessária para o sistema de medição E/M.

Mencionado por Rugina *et al.* (2015) e de acordo com (Giurgiutiu, p. 539, Figura 10.14a), os valores de pico da parte real da impedância correspondem a picos de ressonância da estrutura analisada, com isso é possível obter estimativas da vida útil e degradação da estrutura analisada, conforme mostra a Figura 3.1

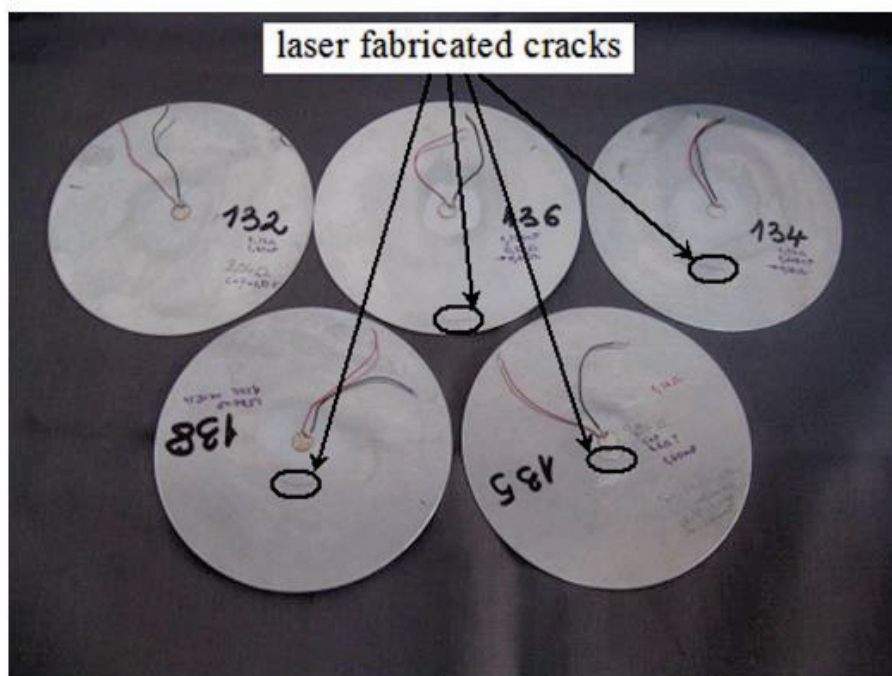
Figura 3.1. Medidor HP4194A ligado a um computador



Fonte: Rugina *et al.*(2015).

Com esse equipamento, foram experimentados danos em estruturas de alumínio, analisando resultados pelos dois métodos, abaixo segue uma figura das estruturas com o transdutor acoplado.

Figura 3.2. Placas experimentais com transdutor piezelétrico



Fonte: Rugina *et al.* (2015).

Ao fazer o experimento, Rugina *et al.* (2015) concluíram que utilizando o HP4194A houve mais confiabilidade de resultados nos dados do que no outro método usando o medidor

que se utiliza do efeito doppler, porém pode ocorrer uma variação nos dados devido a vários fatores.

No entanto, o HP4194A é um analisador de impedância que serve mais para uso acadêmico pois é volumoso e caro, portanto, pesquisas na área têm sido realizadas para encontrar sistemas alternativos de medição de impedância E/M com custo reduzido, logo aplicações práticas em SHM utilizando esse medidor seriam difíceis de serem realizadas.

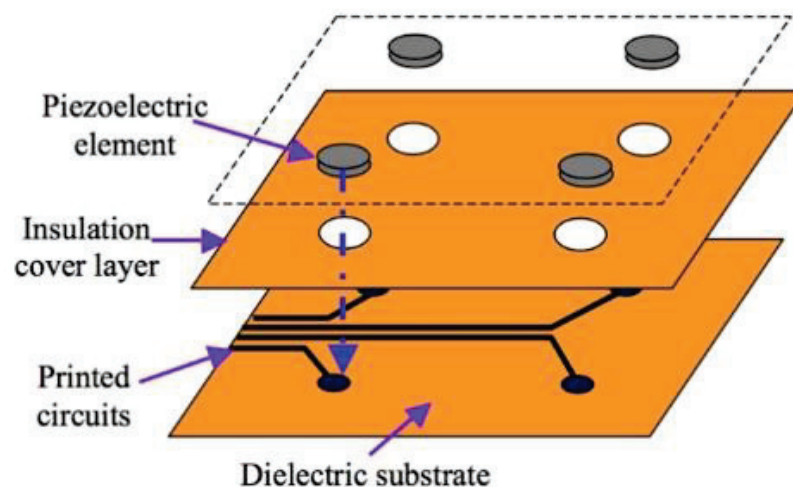
No próximo sistema apresentado, há uma comparação desse medidor com o sistema experimental que será descrito a seguir.

Sistema aplicado para aeronáutica

Os sistemas de SHM para aeronáutica têm obtido muitos êxitos em pesquisas e aplicações, conforme mencionam Qing *et al.* (2019). Os sistemas aeronáuticos estão propensos a sofrer corrosões, danos estruturais devido a degradação natural do tempo e estão expostos a intempéries que podem fazer com que haja necessidade de manutenção muito antes do tempo. Porém, o problema para aplicação de sistemas de SHM usando medição da impedância E/M em estruturas aeronáuticas é a portabilidade e a instalação dos transdutores à sua estrutura.

Os sensores ou transdutores devem ser ligados em rede a fim de analisar e medir danos estruturais à aeronave, como mostra a Figura 3.3.

Figura 3.3. Placa de camadas de sensores piezelétricos.

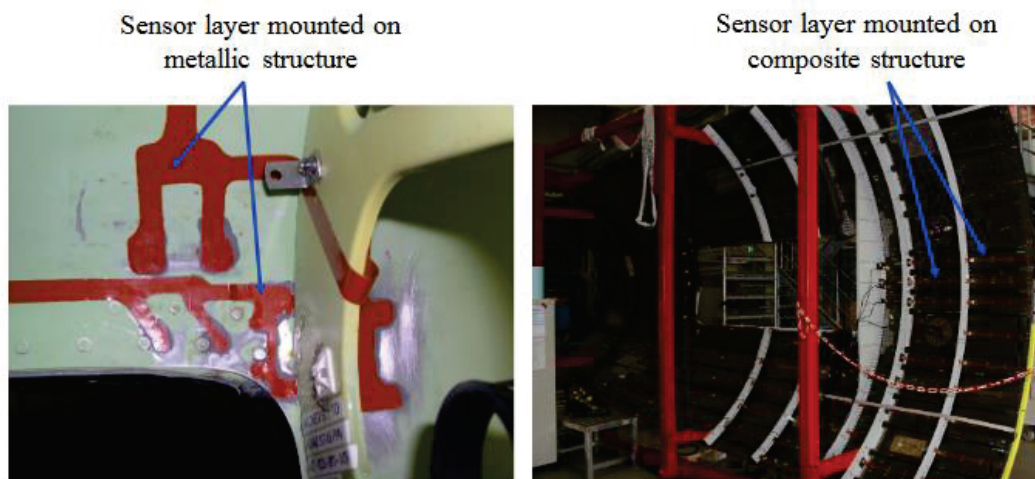


Fonte: Qing *et al.* (2019).

Organizando os sensores dessa maneira, é possível ter facilidade na instalação.

Segundo Qing *et al.* (2019), “as características dessa configuração em camadas é (1) facilidade de instalação,(2) adaptabilidade em qualquer estrutura com geometria complexa, (3)usar em uma rede de sensores, (4) melhoria na atuação e sensoriamento, (5)consistência e confiabilidade das medições, e (6) Proteção aos ruídos E/M”. A instalação dos sensores na estrutura está na figura abaixo.

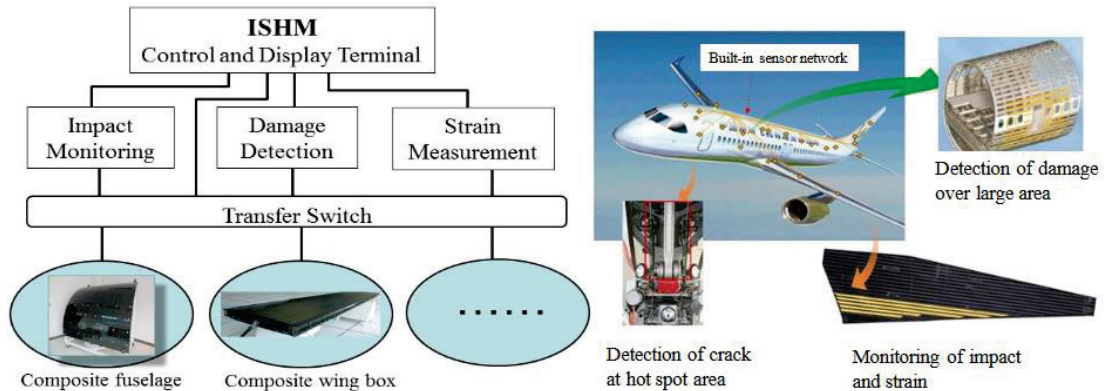
Figura 3.4. Instalação dos sensores na estrutura da aeronave.



Fonte: Qing *et al.* (2019).

Os sistemas de medição E/M aplicados em aeronaves permitiram detectar vários danos estruturais como trincas, corrosão das estruturas, quebra das junções do corpo da aeronave, e para mensurar a localidade onde ocorreu o dano, uma análise estatística foi realizada utilizando RMSD e outras técnicas que se utilizam do desvio padrão para serem calculadas, sendo esses cálculos elaborados computacionalmente, e por ser uma estrutura grande, uma aeronave pode abrigar um medidor robusto para ser utilizado e realizar as medições de danos estruturais. A figura a seguir mostra como o sistema de SHM para aeronaves, desenvolvido por Qing *et al.*(2019) opera.

Figura 3.5. Sistema SHM integrado à aeronave.

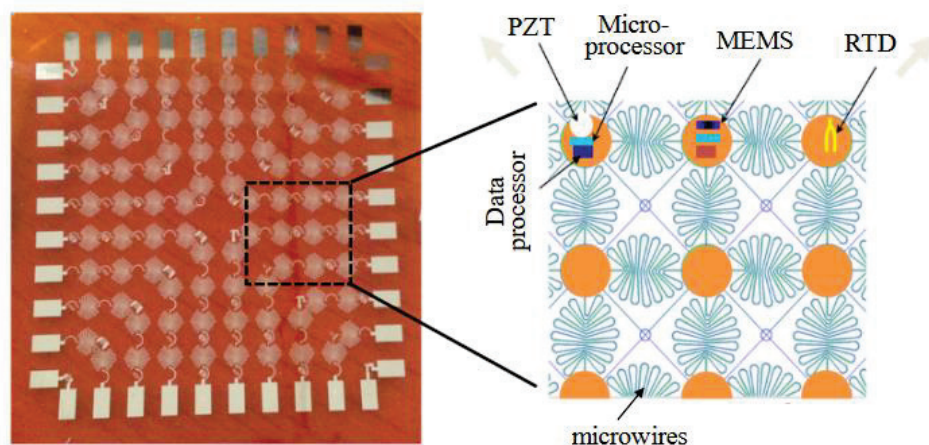


Fonte: Qing *et al.* (2019).

Qing *et al.* (2019) citaram diversos autores, fazendo uma revisão bibliográfica, e o ponto onde há convergência nos estudos é que o sistema de SHM deve atender às normas de aeronavegabilidade da nave, no qual o sistema de SHM utilizando-se de técnica de impedância E/M não interfira nos sinais que a nave se utiliza para operar, como os sinais de radar, GPS, devendo possuir proteção eletromagnética, ser à prova de fogo, proteção contra campos radioativos e descargas atmosféricas. As conexões de cabos do sistema aplicado à estrutura e o elemento que acopla eles a aeronave deve seguir também as normas de aeronavegabilidade.

O atual problema em utilizar sistema SHM em aeronaves é construir a rede dos sensores e como eles operarão juntos. Uma proposta foi elaborar uma rede de sensor multimodal, possuindo microprocessadores que auxiliem nas medições, que segue na figura abaixo.

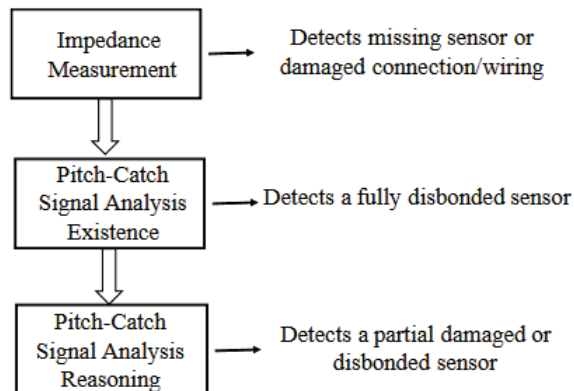
Figura 3.6. Rede de sensores proposta.



Fonte: Qing *et al.* (2019).

Outro problema surgiu, como a possível queima ou dano de um sensor, e como isso afetaria as medições. Logo, houve a necessidade de elaborar um sistema que não levasse em consideração sensores danificados. Abaixo, a lógica para detecção dos danos do sistema desenvolvido por Qing *et al.*(2019).

Figura 3.7. Lógica para detecção de danos aos sensores.



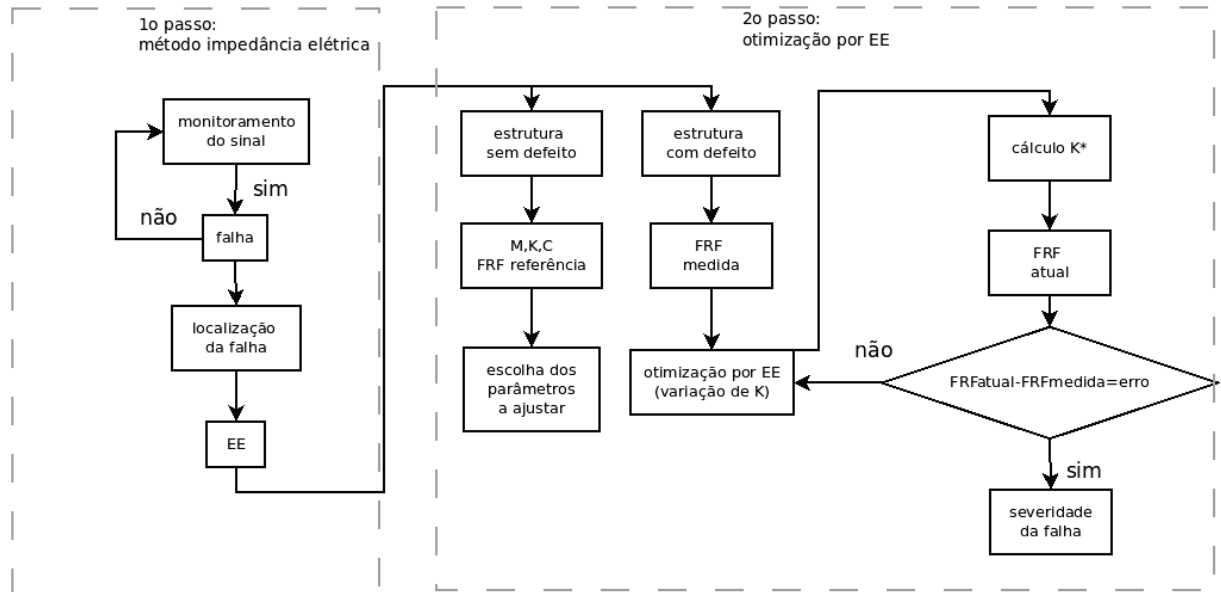
Fonte: Qing *et al.* (2019).

Resumindo, para que os sistemas SHM sejam aplicados a aeronaves, deve haver possibilidade que haja confiabilidade no seu funcionamento e que os sistemas sigam as normas de aeronavegabilidade afim de não ocorrer problemas em sua operação. O próximo sistema, utiliza-se de PC com Matlab para ser utilizado.

Sistemas que Utilizam MATLAB e PC

Tebaldi (2005) desenvolveu um sistema de detecção de falhas em estruturas utilizando estratégias evolutivas, que é um método de resolução de problemas de otimização, que se utiliza da medição da impedância E/M aliada a obtenção de informações quantitativas acerca da falha estrutural.

Figura 3.8. Fluxograma para utilização de estratégia evolutiva em SHM.

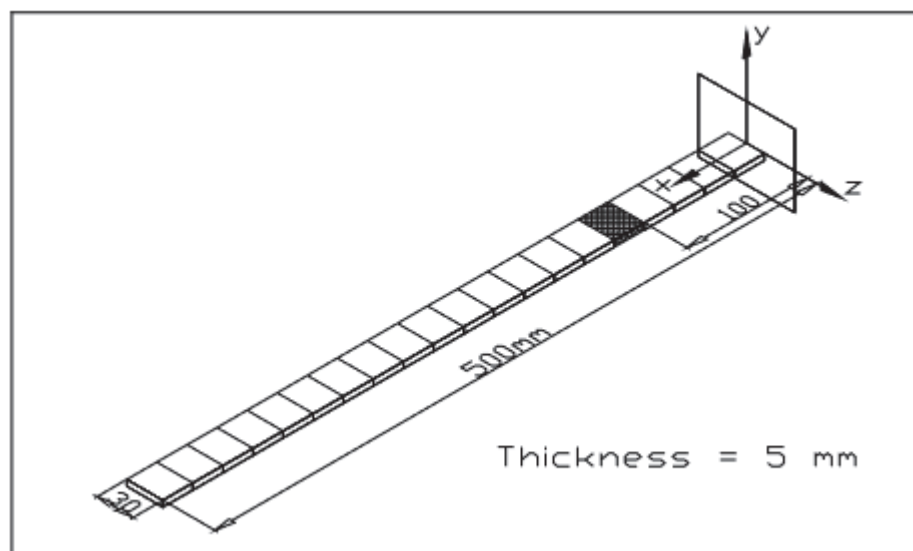


Fonte: Adaptado de Tebaldi (2005).

Segundo Tebaldi (2005) a estratégia evolutiva é utilizada para encontrar a FRF medida (situação com defeito), ajustando os parâmetros M^* , K^* , C^* e a FRF atual (ou padrão) para cada iteração. De acordo com a plotagem das curvas, a diferença entre elas for menor que um valor estabelecido, o processo termina e a diferença entre as matrizes do sistema sem falha, M , K e C , e das matrizes M^* , K^* e C^* fornecem a quantificação do defeito.

Para a pesquisa, Tebaldi (2005) utilizou uma viga de alumínio, como segue na figura a seguir:

Figura 3.9. Viga discretizada utilizada nos experimentos.



Fonte: Tebaldi (2005).

Esta viga teve como defeitos simulados, alteração em sua rigidez, variando de 90% para 40%, e para maximizar a equação, foi utilizada a função *fitness* ou função de adequabilidade:

$$fitness = \frac{K_{fit}}{1+f(x)} \quad (1.4)$$

Onde:

$$f(x) = \sum a_v - a_{tv} \quad (1.5)$$

Com a_v e a_{tv} sendo definidos pelos autovalores das matrizes de rigidez do material com defeito, a matriz obtida pela EE e pela matriz de rigidez da estrutura intacta. Logo, a equação de *fitness* tem o intuito a maximização de $f(x)$.

De posse destes cálculos, é possível avaliar a convergência do *fitness* e aliando a sistemas como inteligência artificial, sistemas nebulosos e redes neurais, obter critérios eficientes para avaliar danos em estruturas.

Tebaldi *et al.* (2006) desenvolveram utilizando de PSO, que é um método de otimização por nuvem de partículas, que possui características similares a computação evolutiva, tem como fundamento, a cada iteração, mudar a velocidade de cada partícula que é cada elemento analisado, para um ponto de melhor posição (*pbest*) e melhor partícula (*gbest*), sendo necessário seguir as etapas a seguir:

- (1) iniciar uma população (matriz) de partículas, com posições e velocidades em um espaço de problema n dimensional, aleatoriamente com distribuição uniforme.
- (2) para cada partículas, avaliar a função de aptidão (função objetivo).
- (3) comparar a avaliação da função de aptidão da partícula com o *pbest* da partícula. Se o valor corrente é melhor que *pbest*, então o valor de *pbest* passa a ser igual ao valor da função de aptidão da partícula, e a localização do *pbest* passa a ser igual a localização atual no espaço n dimensional.
- (4) comparar a avaliação da função de aptidão com o prévio melhor valor de aptidão da população. Se o valor atual é melhor que o *gbest*, atualizar o valor de *gbest* para o índice e valor da partícula atual;
- (5) modificar a velocidade e a posição da partícula de acordo com as equações (1.6) e (1.7), respectivamente:

$$v_i = w \cdot v_i + c_1 \cdot ud(p_i - x_i) + c_2 \cdot Ud.(p_g - x_i) \quad (1.6)$$

$$x_i = (x_i + \Delta t \cdot v_i) \quad (1.7)$$

Com $\Delta t=1$.

- (6) Ir para a etapa (2) até que um critério de parada seja encontrado, usualmente um valor de erro pré-definido ou um número máximo de iterações (gerações).

O parâmetro x_i armazena a posição de cada partícula, v_i armazena a velocidade, p_i armazena o melhor valor de aptidão de cada partícula. O índice g representa o índice da melhor partícula entre todas as partículas do grupo. A variável w é a ponderação de inércia, c_1 e c_2 são constantes positivas; ud e Ud são duas funções para geração de números aleatórios com distribuição uniforme no intervalo $[0,1]$, respectivamente. O tamanho da população é selecionado dependendo do problema.

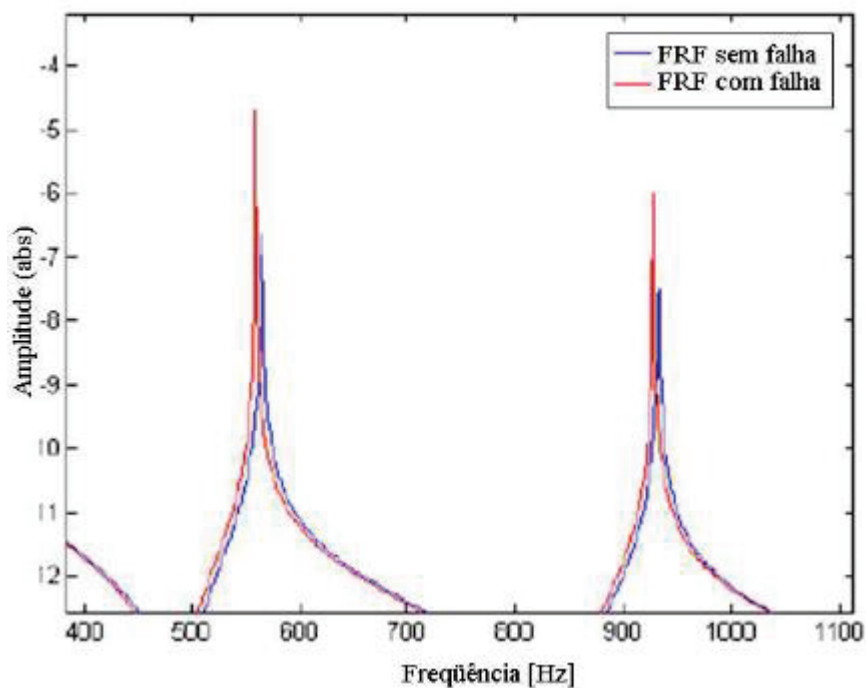
Também, são utilizadas distribuições de probabilidades gaussianas e de cauchy para gerar números aleatórios, para alterar a velocidade da equação (1.6), a fim de utilizar tais ferramentas para análise de danos estruturais. A forma de operação usando o método da PSO é similar ao utilizado na estratégia evolutiva, tanto que o fluxograma de operação da PSO é similar ao da estratégia evolutiva, mudando apenas o método de otimização de EE para PSO.

Para monitorar a ocorrência de falhas, foi utilizada a falha métrica, cuja equação segue abaixo, onde $Z_{i,1}$ é o valor da impedância da estrutura intacta e $Z_{i,2}$ é o valor da impedância em condição normal de operação:

$$M = \sum_{i=1}^n [Z_{i,1} - Z_{i,2}]^2 \quad (1.8)$$

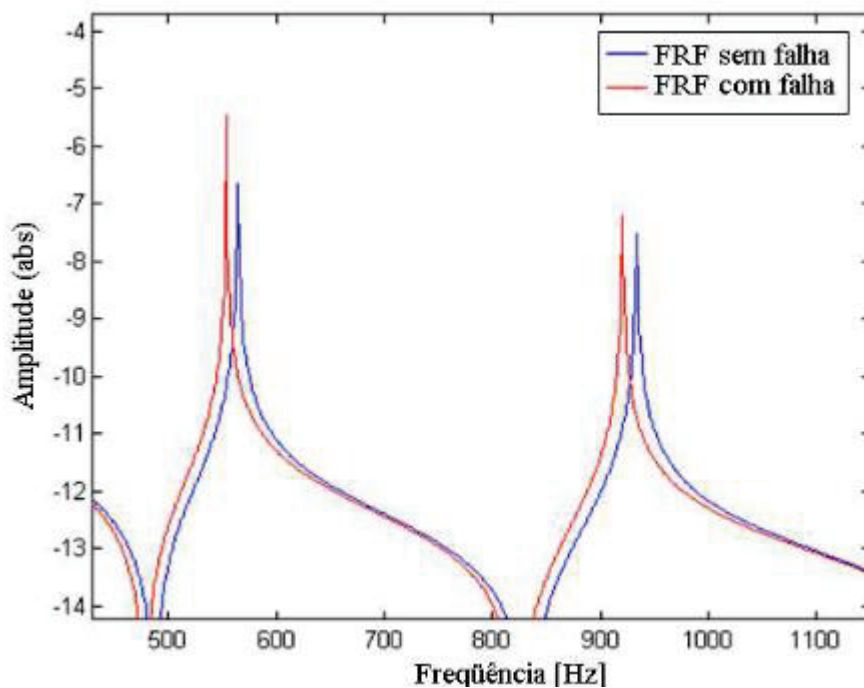
No experimento, Tebaldi *et al.* (2006) utilizaram um analisador de impedância HP 4192A, sendo analisadas as curvas de impedâncias pelo valor da falha métrica. Com isso, foi possível levantar danos estruturais, na Figura 3.10 e 3.11 para determinados casos de estudo, utilizando uma viga de alumínio similar a da Figura 3.9:

Figura 3.10. Danos estruturais: Caso 1 Tebaldi *et al.* (2006).



Fonte: Tebaldi *et al.* (2006).

Figura 3.11. Danos Estruturais: Caso 2 Tebaldi *et al.* (2006)



Fonte: Tebaldi *et al.* (2006).

Comparando a PSO com a estratégia evolutiva, percebeu-se que houve melhores resultados quando há ocorrência de falhas simultâneas. Logo, Tebaldi *et al.* (2006) concluíram que houve melhores resultados com a PSO, seguindo-se a estratégia evolutiva.

Os próximos sistemas apresentados serão de baixo custo.

Sistemas de baixo custo

Os sistemas de baixo custo são a atual tendência para implementações comerciais e de pesquisa, pois utiliza-se de componentes mais baratos quando comparados aos de alto custo.

Nesses sistemas podem ser utilizados DSP (Processadores Digitais de Sinais), microcontroladores, entre outros componentes. Muitos desses sistemas SHM estudados na seção utilizam o AD5933 que é um CI que funciona como analisador de impedância, para interfacear os sensores com um sistema DAQ.

O primeiro sistema apresentado será o desenvolvido por Baptista (2009).

Baptista (2009) desenvolveu um sistema SHM usando sensor PZT, e houve uma percepção de que o PZT é um componente com características capacitivas, logo, operá-lo em frequências muito elevadas ou baixas pode acarretar problemas. O sistema proposto por Baptista (2009) tem como características principais:

Usar um DAQ e resistor para conectar ao sensor PZT.

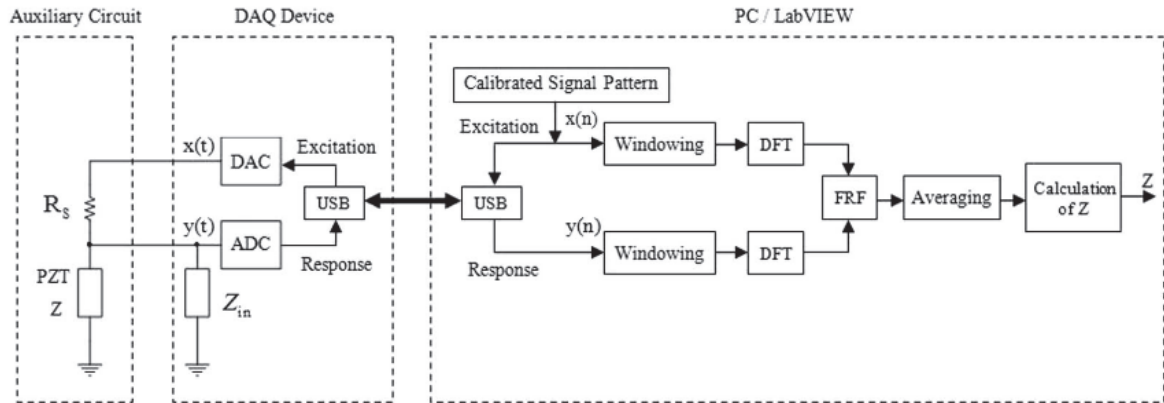
Ser capaz de gerar diferentes sinais para excitar o sensor.

Não havia um DAQ do sinal excitado para as medições.

É simples de implementar em diferentes métricas para avaliar o dano estrutural, sendo portanto facilmente adaptável em sistemas reais.

O princípio de operação do DAQ é enviar o sinal de varredura, e ao detectar uma variação na impedância, armazena este valor numa posição de memória, sendo utilizada a FRF para esse fim. O circuito proposto para o experimento segue na Figura 3.12:

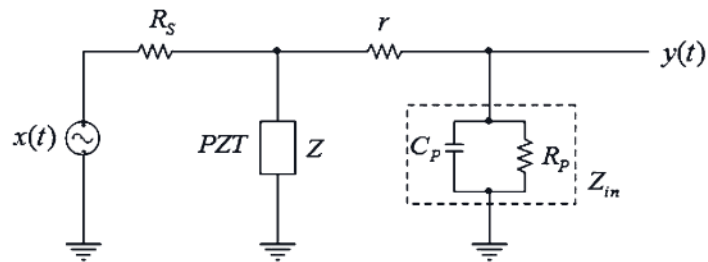
Figura 3.12. Topologia proposta por Baptista (2009) para medição de impedância.



Fonte: Baptista (2009).

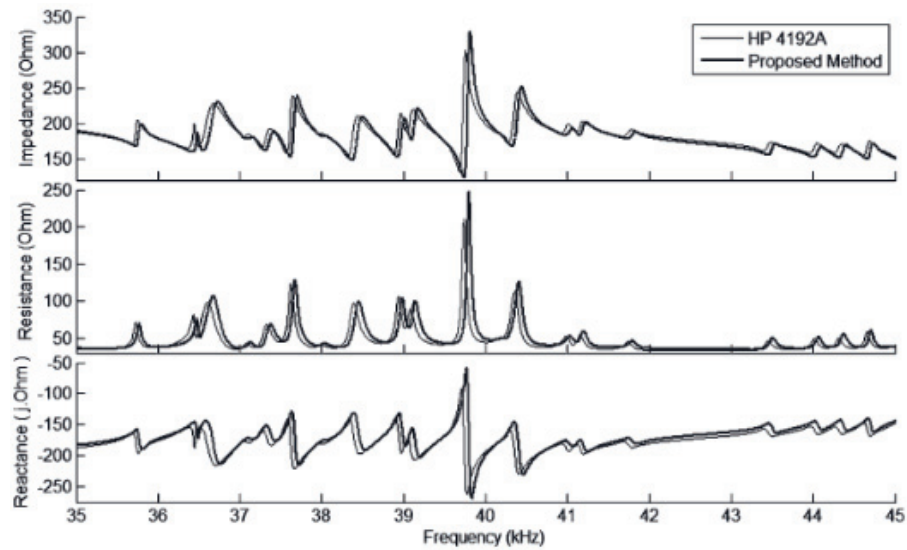
O DAQ proposto foi um USB 6211, possuindo 16-bit como ADC e DAC com taxa de amostragem de 250 KS/s da *National Instruments*, e utilizou o LabVIEW, sendo a conexão do DAQ com o sistema LabVIEW realizada via USB. Os sinais de excitação do PZT são gerados via software, podendo ser senoidal, chirp, triangular, entre outros. Porém, o sinal chirp obteve melhores resultados. O PZT recebe a variação do sinal, logo ela é mandada para o DAQ, para ir ao LabVIEW e ser realizada as métricas no sinal medido e verificar onde ocorreu a falha.

Figura 3.13. Circuito auxiliar de excitação do PZT.



Fonte: Baptista (2009).

Figura 3.14. Comparação entre o HP4192A e o sistema proposto por Baptista (2009).



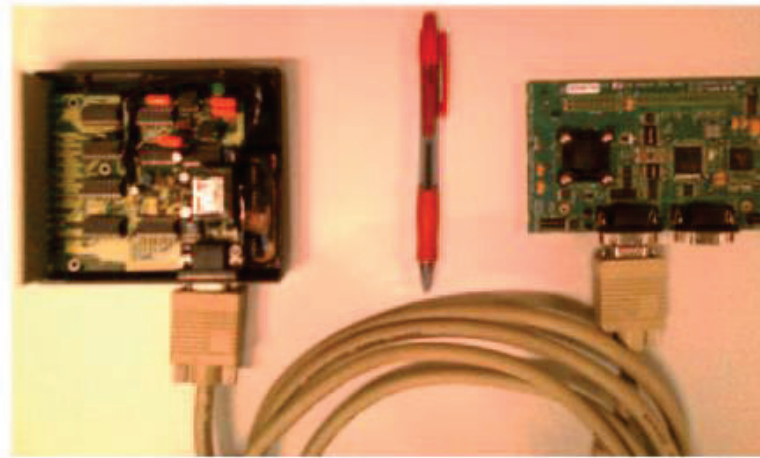
Fonte: Baptista (2009).

É perceptível pelos gráficos que o sistema proposto por Baptista (2009) obteve resposta similar ao do HP4192A, logo é uma boa alternativa.

O próximo sistema utiliza-se de um sistema próprio, desenvolvido no experimento que utiliza-se de um SSCS (Sistema de condicionamento de chaveamento e sinal).

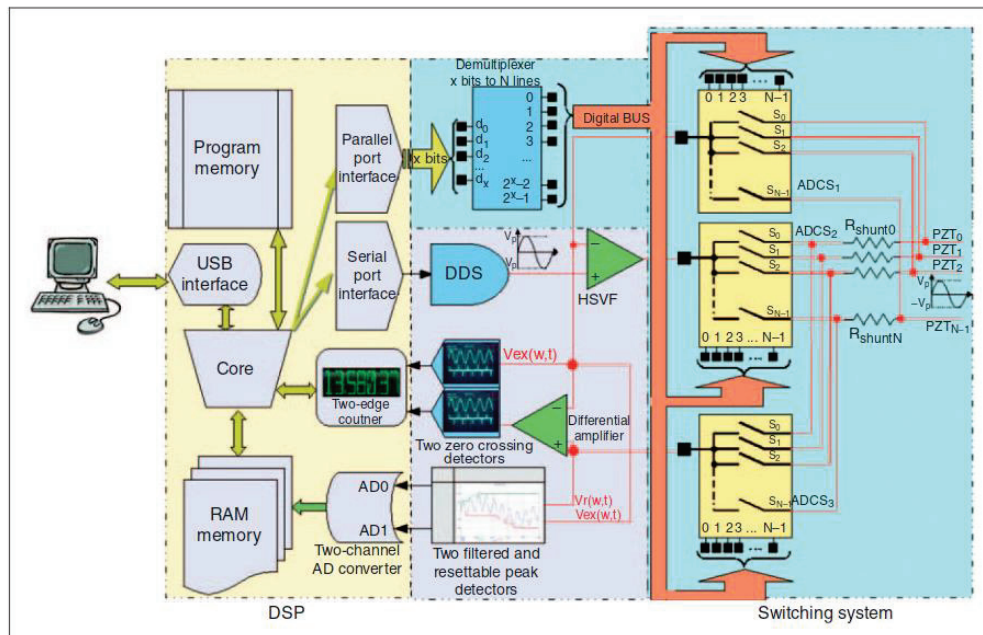
Finzi Neto *et al.* (2010) desenvolveram um sistema SHM que utiliza PC, porém, ligado a um SSCS, sendo esse sistema de topologia híbrida, que calcula a impedância e fase de cada sensor PZT. Nota-se que este sistema possui mais recursos computacionais, e utilizará DSP utilizando-se uma interface com um PC. Com o DSP é possível fazer cálculos de FFT, RMSD e outras métricas necessárias para o sistema. Quando ocorre a variação no sinal enviado para os sensores, o SSCS a reconhece, e manda o sinal medido para o DSP, que gera o sinal e faz o monitoramento da estrutura, que por sua vez o envia ao PC para calcular as métricas.

Figura 3.15. Protótipo do sistema proposto por Finzi Neto *et al.* (2010).



Fonte: Finzi Neto *et al.* (2010).

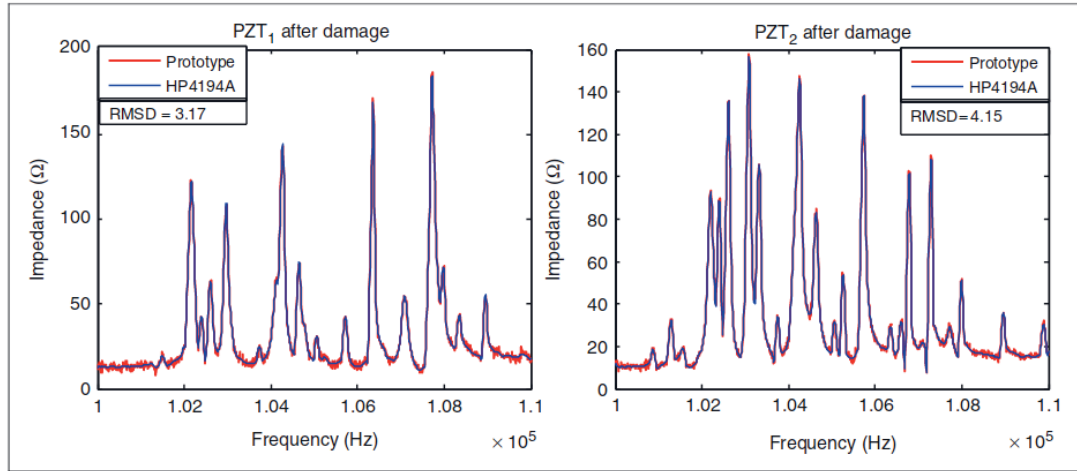
Figura 3.16. Topologia Híbrida proposta por Finzi Neto *et al.* (2010).



Fonte: Finzi Neto *et al.* (2010).

Ao realizar o experimento, Finzi Neto *et al.* (2010) compararam o sistema proposto com um HP4194A, e obteve resultados similares de medição com o analisador de impedância.

Figura 3.17. Comparação entre HP4194A e o protótipo híbrido.

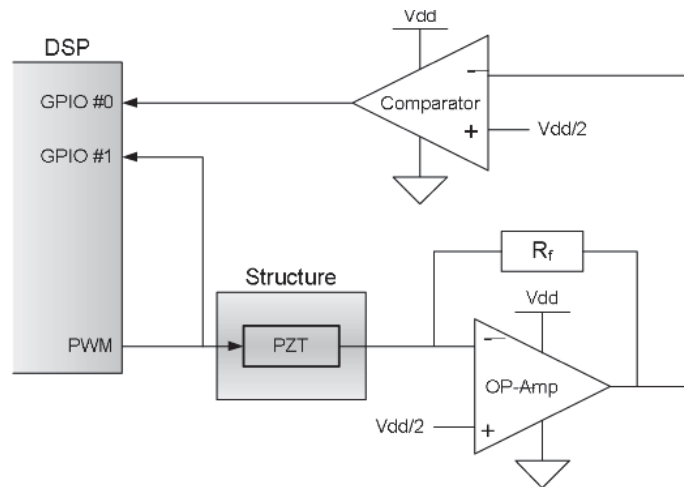


Fonte: Finzi Neto *et al.* (2010).

O próximo sistema apresentado também se utiliza de DSP.

Kim *et al.* (2009) desenvolveram um sistema que também utiliza DSP, e similar ao elaborado por Baptista (2009), porém, nele, o DSP calcula as métricas como a FFT, a RMSD, utilizando um valor base como referência, e um valor medido pelo sistema através dos sensores de PZT ou MFC. Neste sistema, é utilizado um sinal PWM com frequência compatível ao sistema, tomando um valor limite para a impedância da estrutura ser considerada saudável. Neste sistema, são utilizados os pinos GPIO do DSP para fazer as medições das impedâncias.

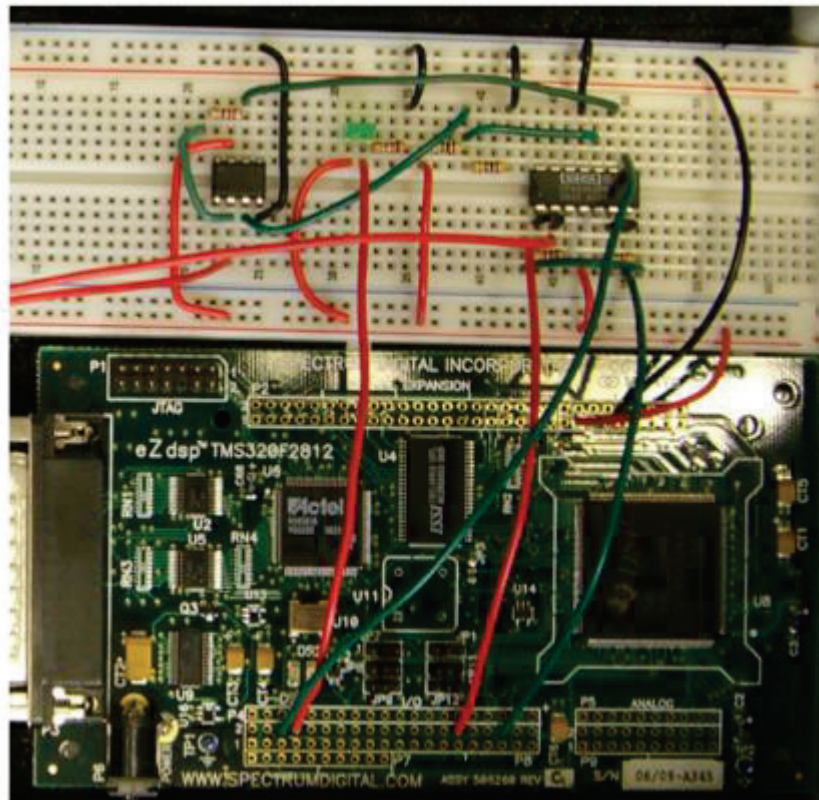
Figura 3.18. Topologia genérica proposta por Kim *et al.* (2009).



Fonte: Kim *et al.* (2007).

O DSP utilizado é um TMS320F2812 EVM da Texas Instruments, utilizando buffers nas entradas e saídas dos Amp-op e do DSP para garantir a máxima transferência de tensão. O comparador é utilizado para discretizar o sinal advindo da estrutura e é colocado na saída do Amp-op. A medição é realizada de 100 Hz a 100 kHz, com passo de 10 Hz, porém o sistema proposto se comportou bem de 12 kHz a 25 kHz. Também avaliou-se que quanto maior a frequência do core do DSP, melhor fica a resolução do sistema proposto por Kim *et al.* (2009), porém, o DSP suporta até 150 MHz. Na Figura 3.19, o circuito proposto no experimento.

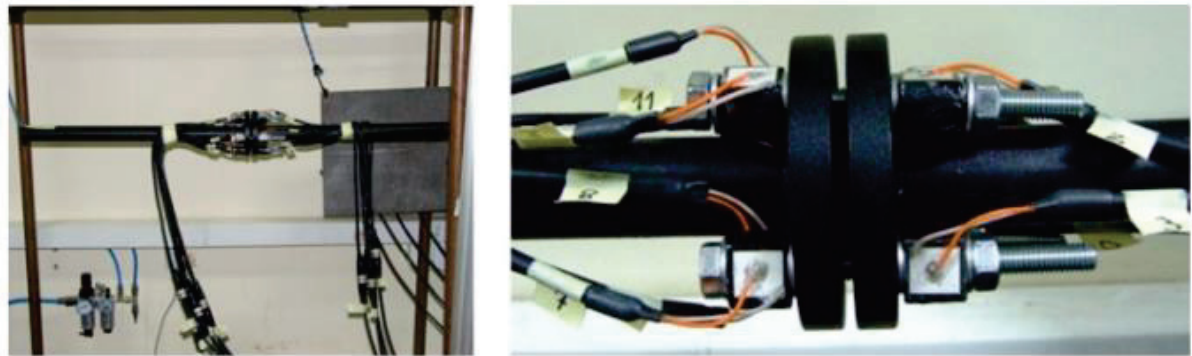
Figura 3.19. Circuito proposto por Kim *et al.* (2009).



Fonte: Kim *et al.* (2009).

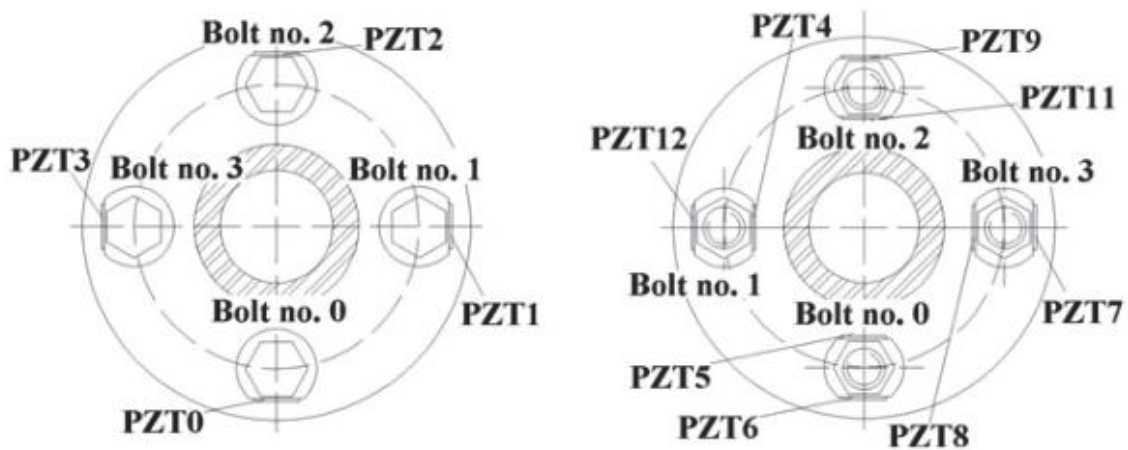
Martowicz *et al.* (2015) desenvolveram um sistema experimental para detecção de danos em junção de canos parafusados, onde o sistema SHM detecta quando há um dano nos parafusos ou mesmo na própria estrutura. A aquisição dos dados é realizado com um DAQ, onde foram calculados índices de danos similares ao RMSD (1.2) e CCDM (1.3). Os sensores PZT são conectados nas arruelas dos parafusos da conexão entre os canos. Na Figura 3.20 e 3.21, os sensores conectados à estrutura para realização do experimento.

Figura 3.20. Sensores conectados á estrutura.



Fonte: Martowicz *et al.*(2015).

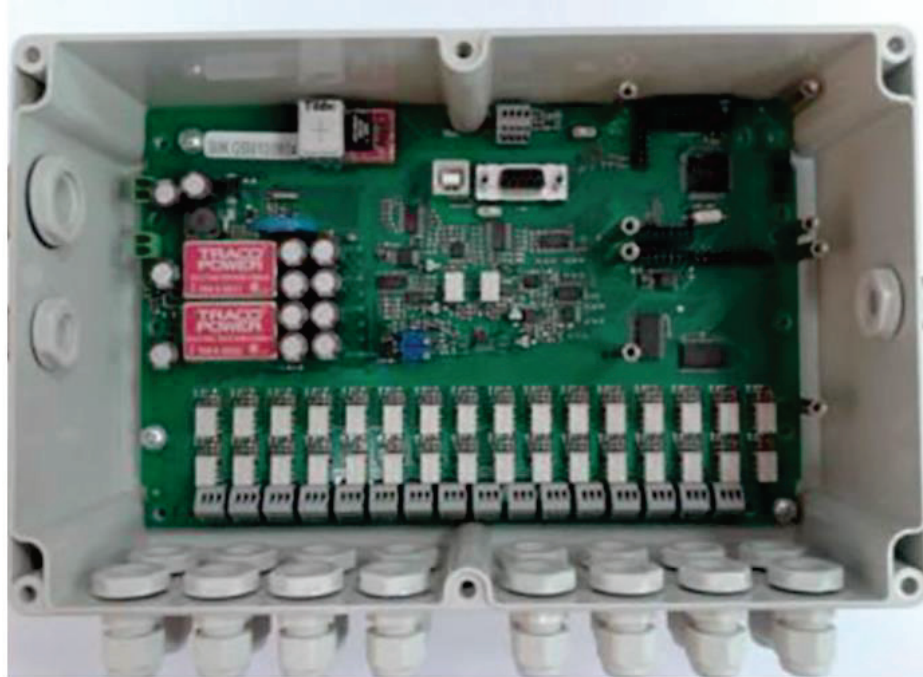
Figura 3.21. Localização dos sensores PZT.



Fonte: Martowicz *et al.*(2015).

O sistema utilizado foi elaborado pela *AGH University of Science and Technology, Department of Robotics and Mechatronics* de cracóvia, na polônia, utilizando um DAQ desenvolvido para o experimento. O sistema de medição de impedância utiliza um AD5933, operando em 100 kHz, e o sistema de processamento de dados utiliza um microcontrolador Atmega128.

Figura 3.22. DAQ Utilizado por MARTOWICZ *et al.* (2015).



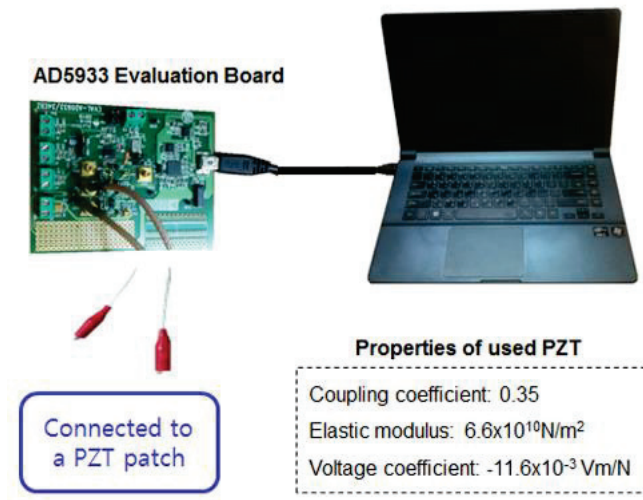
Fonte: Martowicz *et al.*(2015).

A parte experimental foi realizada simulando anormalidades no sistema, como soltando os parafusos, e os resultados obtidos foi uma boa análise dos danos simulados, com o PZT cobrindo uma área que houve boa resposta para a unidade de processamento, e também houve o problema do aumento do dano, sendo realizado exercendo um torque sobre o parafuso que o afrouxa, sem encontrar possíveis correlações entre esses problemas.

O próximo sistema apresentado utiliza-se de uma placa com o AD5933.

Na e Park (2017) elaboraram um sistema de baixo custo, utilizando uma Placa com o AD5933 e um software, ambos desenvolvidos pela *Analog Devices*, que calcula as métricas já vistas, como a RMSD (1.2) e a CCDM (1.3), podendo também calcular FFT, DFT, pois o sistema é basicamente uma placa ligada a um PC, que realiza os cálculos. É possível coletar até 500 pontos de medição, segundo Na e Park (2017).

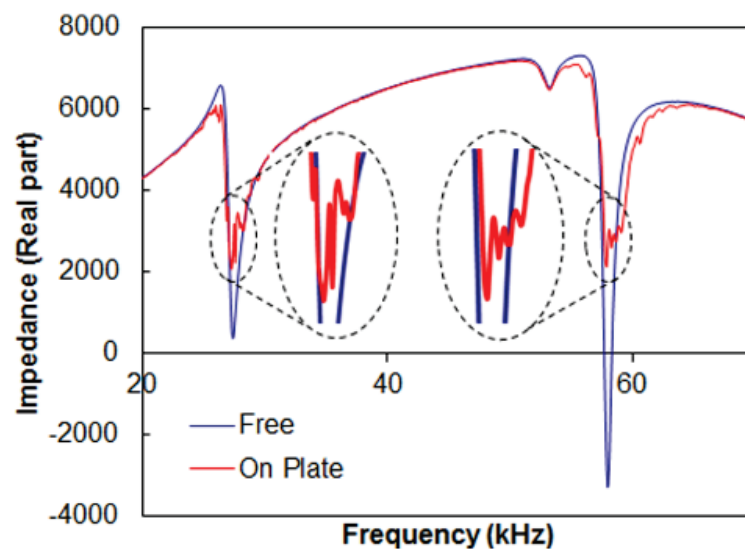
Figura 3.23. Sistema Proposto por Na e Park (2017) para Experimento.



Fonte: Na e Park (2017).

O experimento consistiu em acoplar os sensores em chapas, que tinham superfície regular, outra avariada, e uma seriamente danificada, com isso levantou-se os resultados da análise do sistema. Notou-se também que ao adicionar um quarto sensor, as ressonâncias dos sensores sofreram uma queda, logo eles poderiam gerar sinais para medição de impedância maiores que o previsto. A seguir na figura 3.24 um gráfico de análise dos sensores antes e após coloca-los na superfície.

Figura 3.24. Gráfico de análise.



Fonte: Na e Park (2017).

Em nível de análise, os resultados foram satisfatórios, pois na maior parte das frequências analisadas pelo sistema, os sensores puderam detectar os danos estruturais simulados.

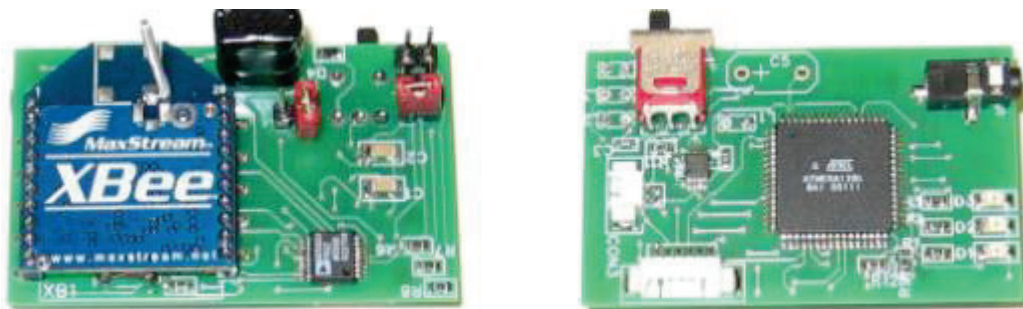
Também foram notados alguns aspectos sobre o sistema como singularidades, no fluxo de energia entre os sensores, que acaba interferindo na medição das impedâncias dos sensores, e foram vistos casos onde um sensor estava sentindo a variação na impedância, e caso onde todos os sensores também sentiam a variação de impedância.

O próximo sistema apresentado também utiliza o AD5933.

Overly *et al.* elaboraram um sistema de baixo custo utilizando o AD5933 que operará como um sistema *Wireless* através do protocolo *Xbee* que possuiu como características e que segue na figura 3.25:

1. Habilidade de medir mais de um sensor.
2. Capacidade de faixas de valores de impedâncias diferentes.
3. Baixo consumo de energia em *standby*.
4. Modos de *standby* mais versáteis.
5. Maior capacidade de armazenamento de dados.

Figura 3.25. Primeiro módulo proposto por Overly *et al.*

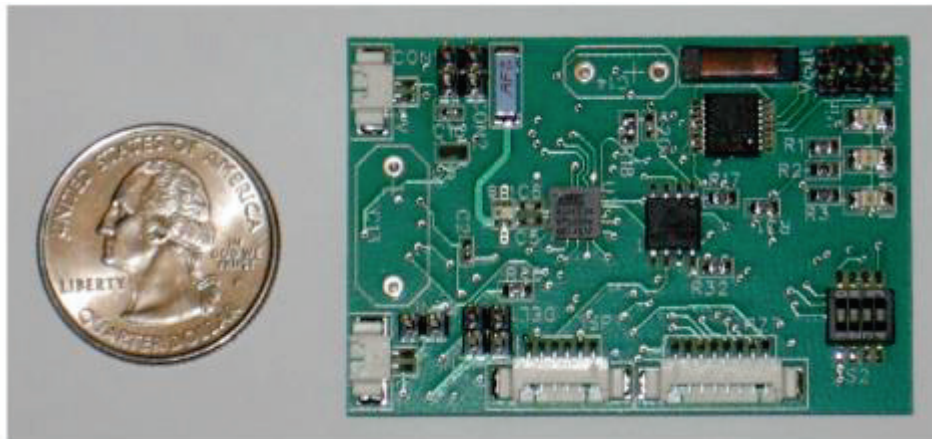


Fonte: Overly *et al.*

Também foi desenvolvida uma segunda versão da topologia de Overly *et al.* que utilizava mais memória, usava multiplexador para até 7 sensores, dois métodos independentes

para sair do *standby* e menor consumo de energia quando comparado a primeira versão quando em *standby*, que segue na figura 3.26

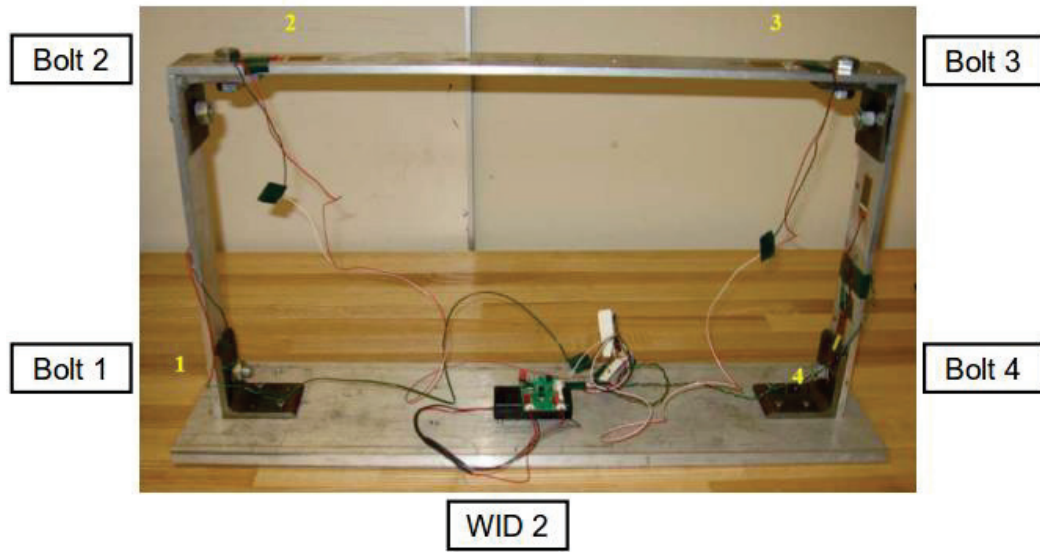
Figura 3.26. Módulo proposto por Overly *et al.*



Fonte: Overly *et al.*

O sistema utilizava o AT86RF230 que é um transmissor de rádio, e o ATmega1281, que é um microcontrolador. Também foi comparado ao Agilent 4294A que é um analisador de impedância de alto custo, que custa USD 41.000, enquanto o sistema proposto por Overly *et al.* Custava USD 200. Em nível de resultados, o sistema proposto se comportou muito bem quando comparado a um analisador de impedância comercial de alto custo, tendo pouca variação no que diz respeito a qualidade dos resultados obtidos. A estrutura experimental segue na Figura 3.27.

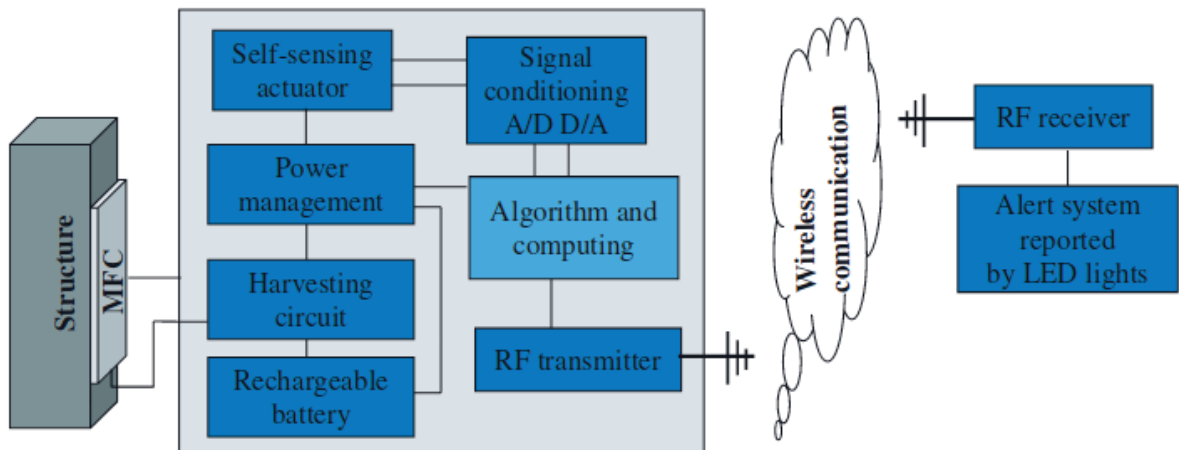
Figura 3.27. Estrutura experimental.



Fonte: Overly *et al.*

Park *et al.* (2008) elaboraram um sistema SHM de baixo custo com um AD5933 e sensor MFC. O sistema consome energia coletada no próprio ambiente onde está instalado, e analisa os dados e os envia via wireless as medições da estrutura para um sistema de alerta. A topologia segue na figura 3.28.

Figura 3.28. Topologia proposta por Park *et al.* (2008).

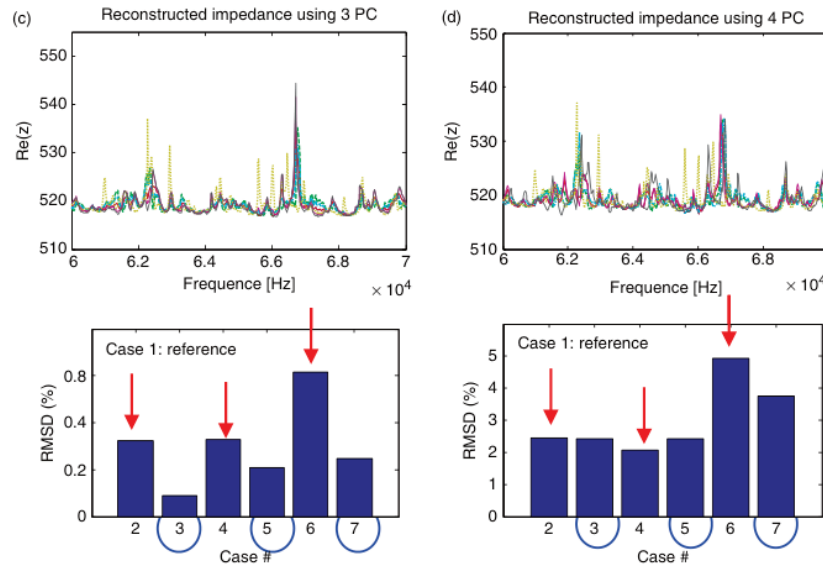


Fonte: Park *et al.* (2008)

Experimentalmente, utilizou-se de parafusos instalados numa placa de alumínio, onde conectou um sensor MFC, e para envio do dado para o sistema de análise, foi utilizada outra métrica, a PCA (Análise de componente principal), que viabiliza a diminuição dos dados

processados, eliminando ruídos desnecessários com as análises sendo mostradas na figura 3.29.

Figura 3.29. Métricas analisadas por Park *et al.* (2008)



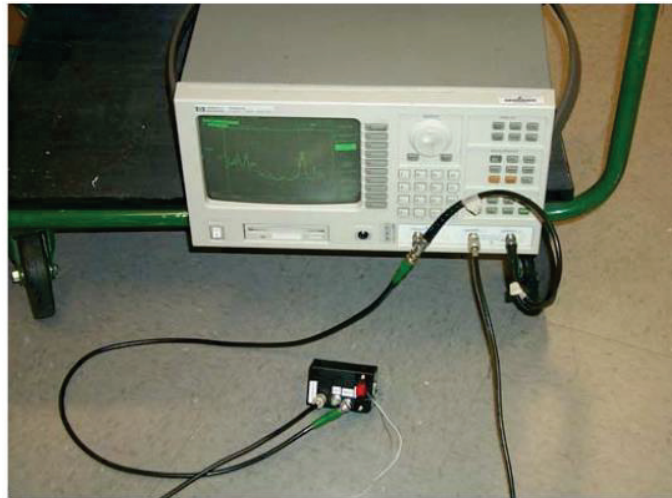
Fonte: Park *et al.* (2008)

Os resultados obtidos para o experimento de Park *et al.* (2008) foram satisfatórios, pois a PCA se provou ser uma boa métrica para analisar as impedâncias medidas, aplicando RMSD (1.2).

O próximo sistema apresentado utiliza-se de um analisador de FFT.

Peairs *et al.* elaboraram um sistema SHM utilizando um analisador de FFT, que tem o propósito de baratear o sistema, haja visto que já foi mencionado em seções anteriores, o custo de um analisador de impedância comercial. Nesse sistema, utilizou sensores PZT ligados a um circuito de medição de corrente. O sistema proposto segue na figura 3.30.

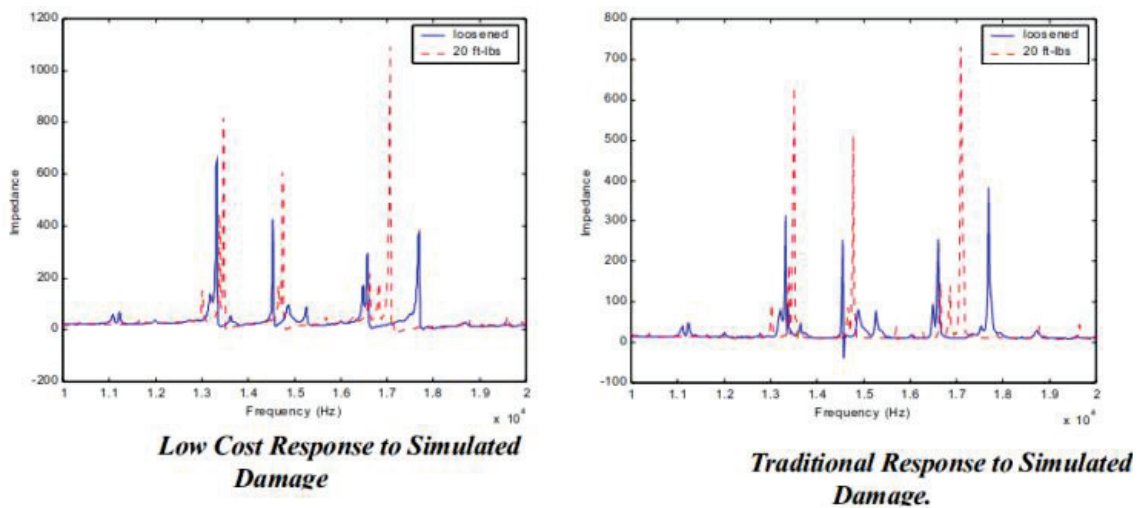
Figura 3.30. Sistema proposto por PEAIRS *et al.*



Fonte: Peairs *et al.*

Para o experimento, Peairs *et al.* utilizou-se da técnica de medição de impedância de juntas parafusadas, e depois utilizou de uma estrutura metálica. A comparação entre o sistema proposto e um tradicional segue na figura 3.31.

Figura 3.31. Comparação entre o sistema proposto por Peairs *et al.* e um tradicional.



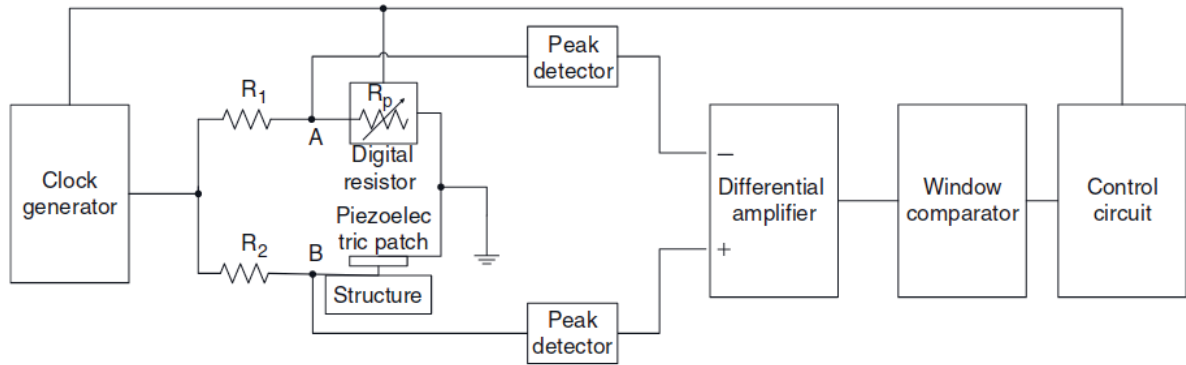
Fonte: Peairs *et al.*

Os resultados obtidos foram satisfatórios, pois o sistema proposto avaliou bem os danos quando comparado a um sistema tradicional, que utiliza analisador de impedância.

O próximo sistema apresentado utiliza-se de um circuito de topologia própria, elaborado pelos próprios pesquisadores.

Shirui Wang e Chao You (2008) desenvolveram um sistema de baixo custo utilizando um circuito em ponte para medição da impedância, entre outros arranjos, como detector de pico, amplificador diferencial, comparador de janela. Segue a imagem do circuito proposto na figura 3.32:

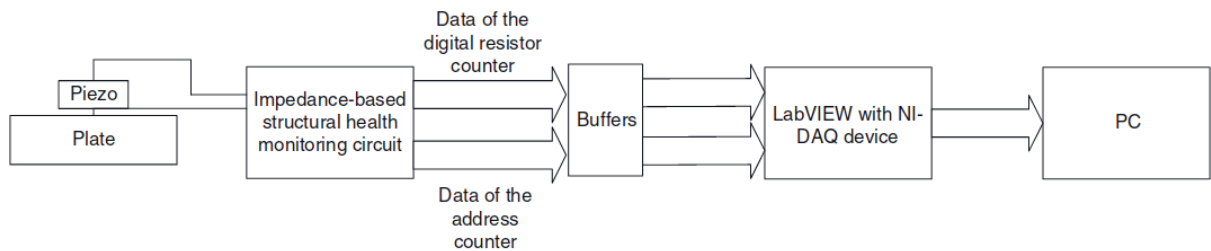
Figura 3.32. Topologia Proposta por Shirui Wang e Chao You (2008).



Fonte: Shirui Wang e Chao You (2008).

O resistor digital utilizado é um DS1666, e o sistema difere dos vistos, pois utiliza um sinal de clock na entrada do circuito de ponte, que mede a impedância dos sensores. O sistema proposto por Shirui Wang e Chao You (2008) foi ligado a um sistema que roda o *LabVIEW* e a um DAQ, que manda os dados para um PC. A montagem em blocos segue na figura 3.33:

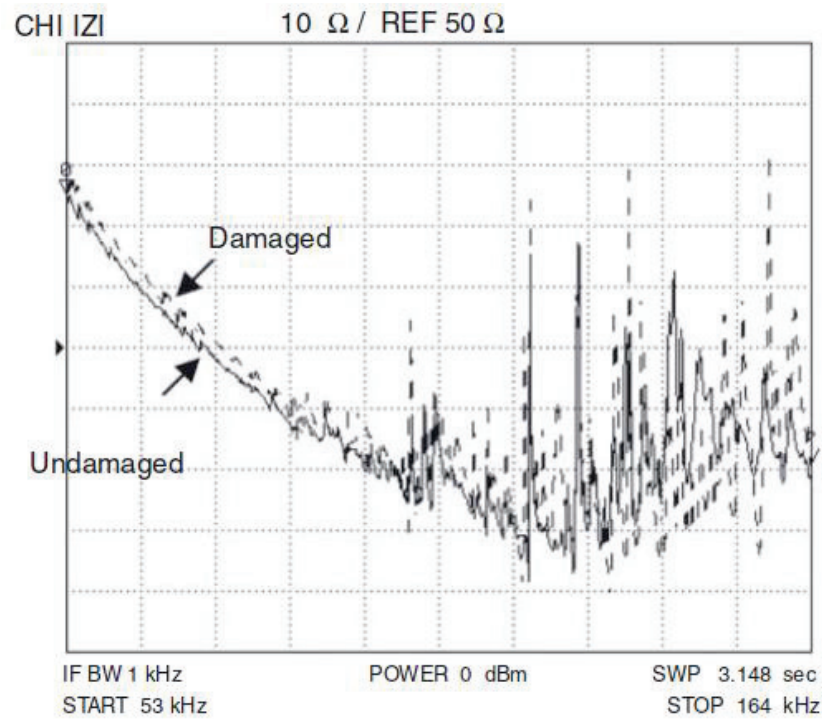
Figura 3.33. Montagem experimental em blocos.



Fonte: Shirui Wang e Chao You (2008).

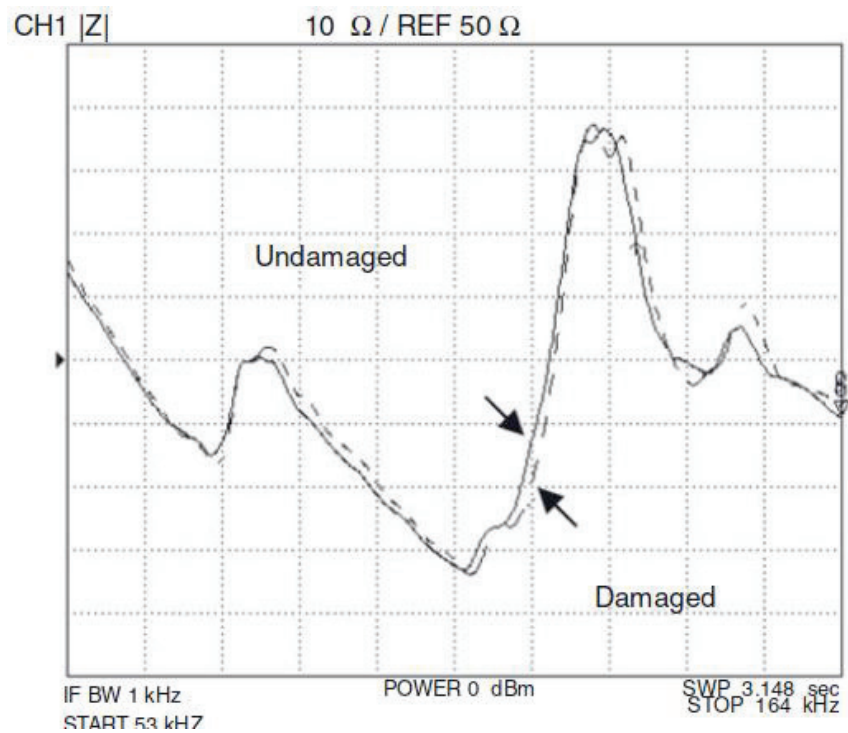
Os experimentos foram realizados em uma placa de alumínio e de madeira, e os resultados para a superfície de alumínio e de madeira seguem na figura 3.34 e 3.35:

Figura 3.34. Resultados para superfície de alumínio.



Fonte: Shirui Wang e Chao You (2008).

Figura 3.35. Resultados para superfície de madeira.



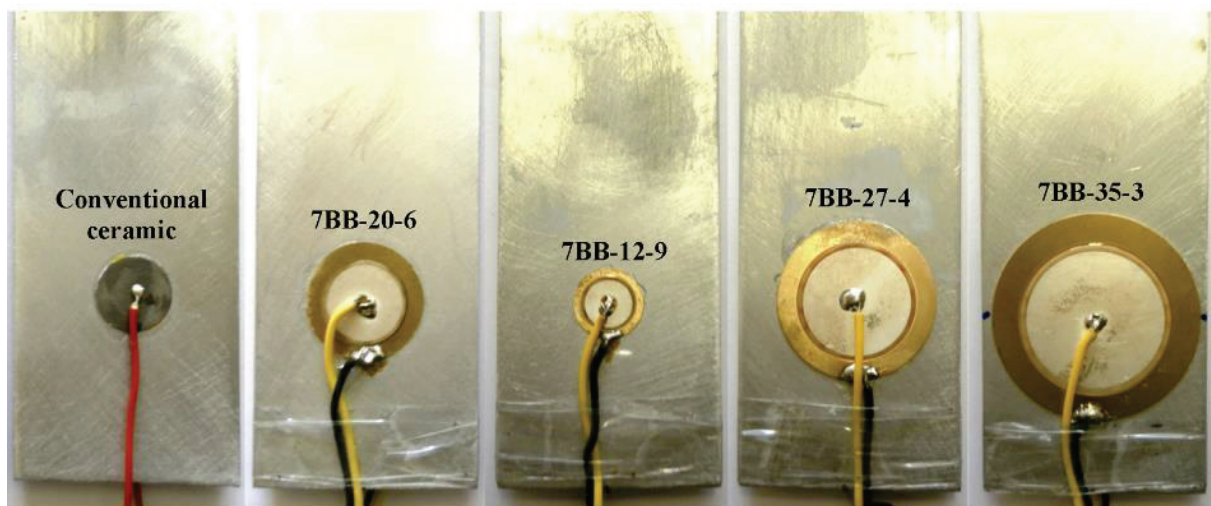
Fonte: Shirui Wang e Chao You (2008).

A fim de atestar os resultados, utilizou-se da RMSD (1.2) como métrica, e de acordo com os gráficos apresentados, houve bons resultados.

O próximo experimento utilizou o sistema desenvolvido por Baptista (2009).

Silva de Freitas e Guimarães Baptista (2015) utilizaram o sistema proposto e descrito no início desta seção desenvolvido por Baptista (2009), para mensurar a qualidade da medição de impedância E/M de diferentes tipos de sensores piezelétricos que são mostrados na figura 3.36, e o resultado foi satisfatório, com os sensores respondendo de forma adequada aos estímulos. A métrica utilizada para o experimento foi a PSD e a RMSD (1.2).

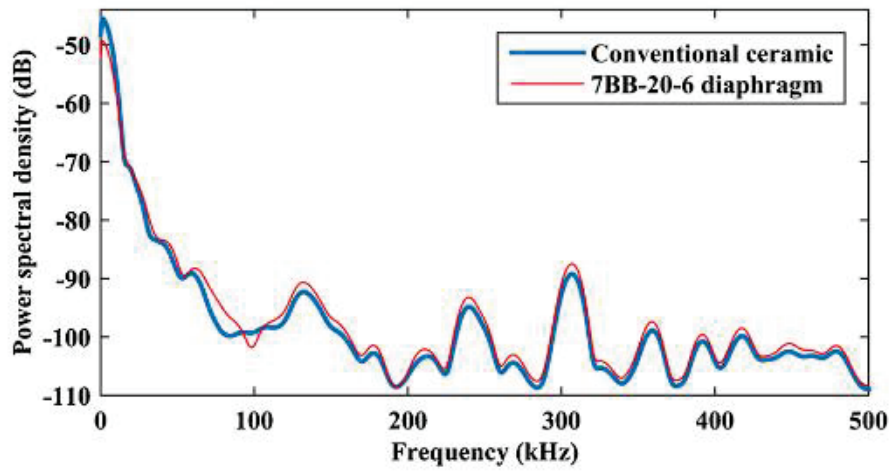
Figura 3.36. Sensores avaliados por Silva de Freitas e Guimarães Baptista (2015)



Fonte: Silva de Freitas e Guimarães Baptista (2015).

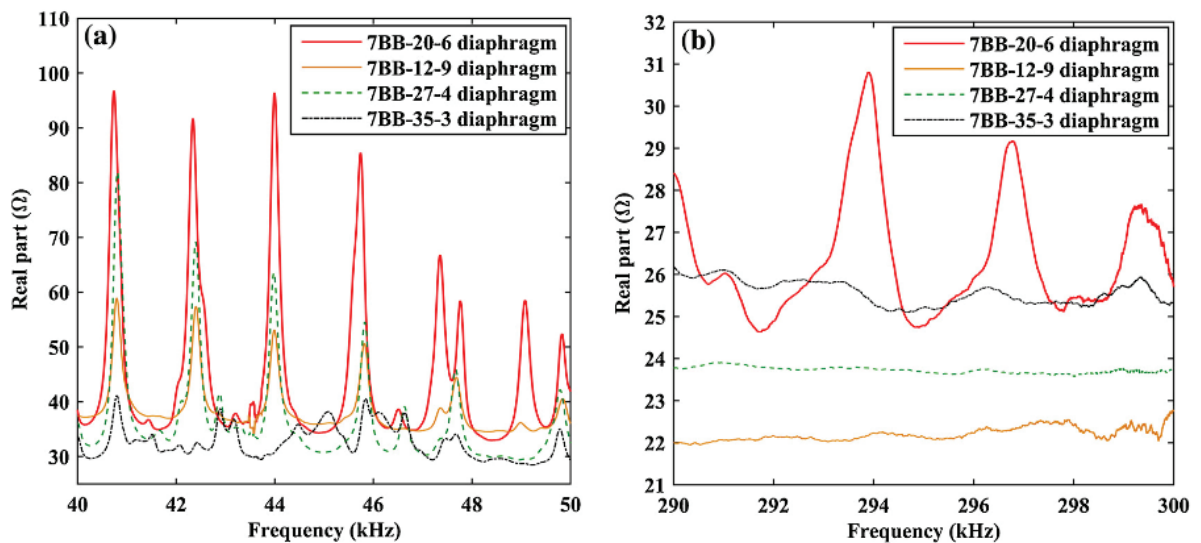
Os resultados seguem na figura 3.37 e 3.38:

Figura 3.37. Resultado da comparação entre um sensor convencional e o 7BB-20-6.



Fonte: Silva de Freitas e Guimarães Baptista (2015).

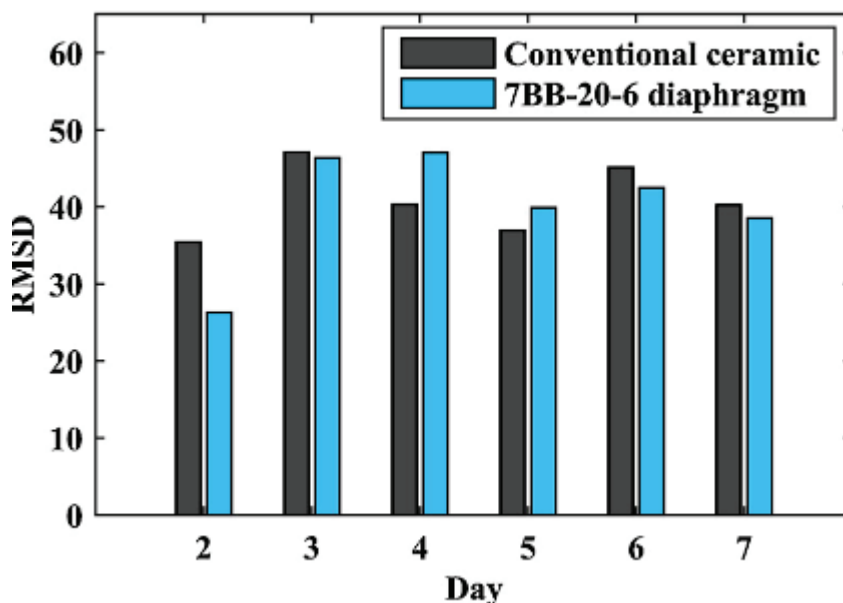
Figura 3.38. Resultado da comparação entre diversos sensores mostrados na Figura 3.31.



Fonte: Silva de Freitas e Guimarães Baptista (2015).

A banda de frequência utilizada foi de 0 a 500kHz, variando de 5kHz, e o experimento foi realizado em 7 dias, cada dia fazendo uma medição, que chegou no resultado que segue na figura 3.39:

Figura 3.39. Comparação final entre um sensor tradicional e o 7BB-20-6.



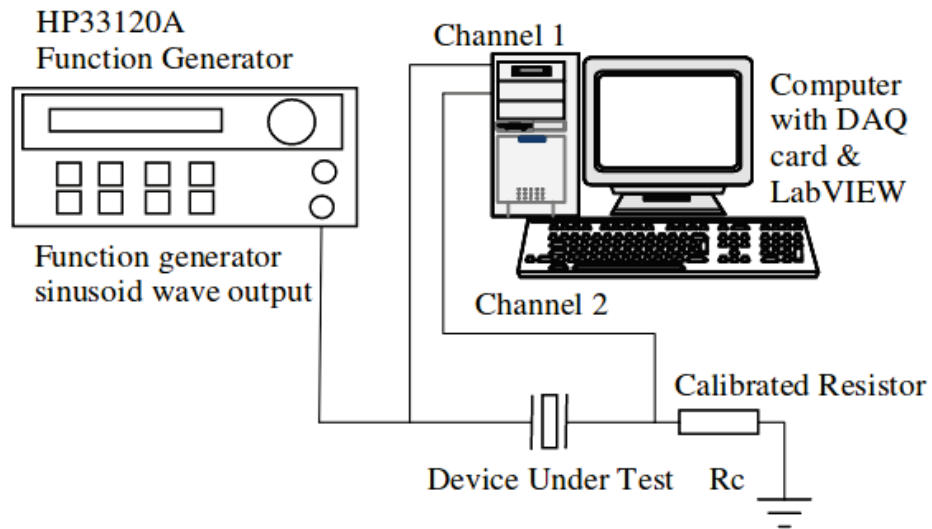
Fonte: Silva de Freitas e Guimarães Baptista (2015).

O resultado percebido foi que se faz necessário mais estudos afim de avaliar se os sensores estudados podem ser utilizados em diferentes estruturas e condições ambientais.

O próximo sistema apresentado se utiliza de um DAQ próprio e compara-se ao HP4194A, apresentado no início da seção de sistemas de alto custo.

Buli e Giurgiutiu (2005) utilizaram como estudo, uma placa DAQ baseada em um sistema analisador de impedância de baixo custo, aplicando sinal do tipo chirp e outro sinal de varredura de frequência senoidal, utilizado para varrer o sistema e encontrar variações na impedância medida, fazendo testes em um painel de alumínio, comparando o sistema proposto com um HP4194A.

Figura 3.40. Sistema proposto por Buli e Giurgiutiu (2005).

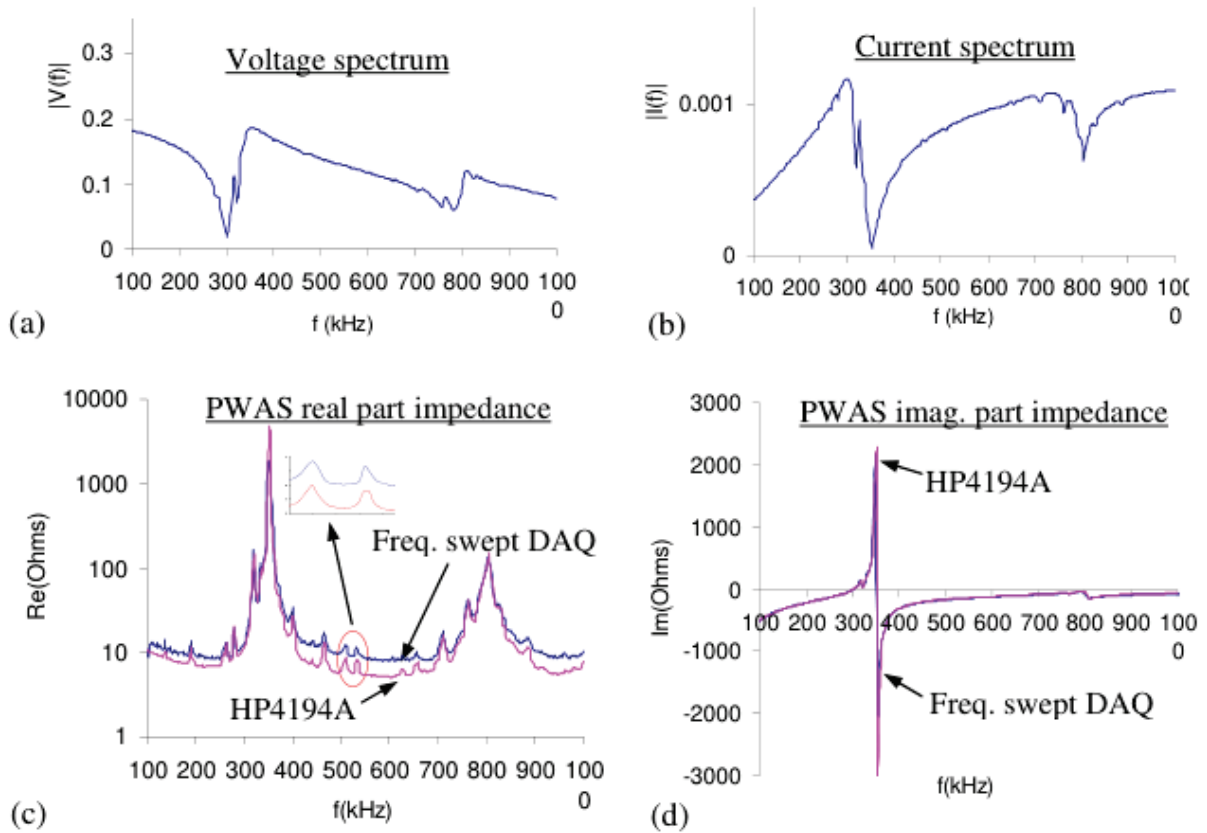


Fonte: Buli e Giurgiutiu (2005).

A métrica utilizada foi a FFT, pois ela foi capaz de medir a resposta para todas as frequências analisadas. Logo, como resultados, foi analisado que utilizando diversos componentes e utilizando um DAQ de alta performance para conversão AD/DA, foi possível obter um analisador de impedância de baixo custo para ser utilizado em sistemas SHM.

A seguir, a relação dos resultados encontrados no Experimento conduzido por Buli e Giurgiutiu (2005):

Figura 3.41. Resultados encontrados por Buli e Giurgiutiu (2005).



Fonte: Buli e Giurgiutiu (2005).

De acordo com os resultados apresentados no gráfico acima, o sistema estudado se comportou bem nas frequências onde o sensor apresentava sua ressonância e próximas a ela. Como o sistema ao que foi comparado é um sistema de alto custo HP4194, logo a aproximação pelo DAQ desenvolvido foi bem aceita.

4 Considerações Finais

No trabalho foram discutidos diversos sistemas de SHM, desde os mais experimentais de alto custo, até os de baixo custo, que são a tendência das pesquisas da área. Pode-se verificar que as pesquisas de sistemas de baixo custo apesar do custo reduzido, estão melhorando a ponto de estar em um ponto que em determinadas condições e parâmetros, se comporta de forma similar aos sistemas de alto custo, que utilizam analisadores de impedância de valor elevado.

5 Referências Bibliográficas

BAPTISTA, F.G.; FILHO, J.V. A New Impedance Measurement System for PZT-Based Structural Health Monitoring. **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**, v. 58, n. 10, p. 3602–3608, 2009.

BAPTISTA, F. G. Uma Contribuição aos Sistemas de Monitoramento de Integridade Estrutural Baseados na Impedância Eletromecânica. 2010. 91 f. Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, 2010.

EATON, M. et al. Use of Macro Fibre Composite Transducers as Acoustic Emission Sensors. *Remote Sensing*, v. 1, n. 2, p. 68–79, 24 abr. 2009.

FARRAR, Charles R; WORDEN, Keith. An introduction to structural health monitoring. **Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences**, v. 365, n. 1851, p. 303–315, 2007.

FINZI NETO, Roberto M; STEFFEN, Valder; RADE, Domingos A; *et al.* A low-cost electromechanical impedance-based SHM architecture for multiplexed piezoceramic actuators. **Structural Health Monitoring**, v. 10, n. 4, p. 391–402, 2011.

FREITAS, Ricardo Luiz Barros de, FABRICAÇÃO, CARACTERIZAÇÃO E APLICAÇÕES DO COMPÓSITO PZT/PVDF, 2012.

JAIN, Anjana; K. J., Prashanth; SHARMA, Asheesh Kr.; *et al.* Dielectric and piezoelectric properties of PVDF/PZT composites: A review. **Polymer Engineering & Science**, v. 55, n. 7, p. 1589–1616, 2015.

KIM, Jina; GRISSE, Benjamin L.; HA, Dong S.; *et al.* A system-on-board approach for impedance-based structural health monitoring. *In: TOMIZUKA, Masayoshi; YUN, Chung-Bang; GIURGIUTIU, Victor (Orgs.). San Diego, California: [s.n.], 2007, p. 652900. Disponível em: <<http://proceedings.spiedigitallibrary.org/proceeding.aspx?doi=10.1117/12.715791>>. Acesso em: 9 jun. 2022.*

KORNMAN, X. et al. ACTIVE FIBRE COMPOSITES: SENSORS AND ACTUATORS FOR SMART COMPOSITES & STRUCTURES. p. 9, [s.d.].

LI, Bo; WANG, Dan; WANG, Feng; *et al.* High Quality Sensor Placement for SHM Systems: Refocusing on Application Demands. *In: 2010 Proceedings IEEE INFOCOM*. San Diego, CA, USA: IEEE, 2010, p. 1–9. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/5462159/>>. Acesso em: 9 jun. 2022.

LIANG, Chen; SUN, Fanping; ROGERS, Craig A. Electro-mechanical impedance modeling of active material systems. p. 17, .

MARQUI, Clayton Rodrigo; BUENO, Douglas Domingues; BAPTISTA, Fabrício Guimarães; *et al.* EXTERNAL DISTURBANCE EFFECT IN DAMAGE DETECTION USING ELECTRICAL IMPEDANCE. p. 10, .

MARTOWICZ, Adam; SENDECKI, Arkadiusz; SALAMON, Marcin; *et al.* Application of electromechanical impedance-based SHM for damage detection in bolted pipeline connection. **Nondestructive Testing and Evaluation**, v. 31, n. 1, p. 17–44, 2016.

NA, Wongi; BAEK, Jongdae. A Review of the Piezoelectric Electromechanical Impedance Based Structural Health Monitoring Technique for Engineering Structures. **Sensors**, v. 18, n. 5, p. 1307, 2018.

NA, Wongi S; PARK, Ki-Tae. A cost-effective impedance-based structural health monitoring technique for steel structures by monitoring multiple areas. **Journal of Intelligent Material Systems and Structures**, v. 28, n. 2, p. 154–162, 2017.

OVERLY, Timothy G. S.; PARK Gyuhae, . FARRAR Charles R; Development of Impedance-based Wireless Active-sensor Node for Structural Health Monitoring

PARK, Seunghee; LEE, Jong-Jae; YUN, Chung-Bang; *et al.* Electro-Mechanical Impedance-Based Wireless Structural Health Monitoring Using PCA-Data Compression and k -means Clustering Algorithms. **Journal of Intelligent Material Systems and Structures**, v. 19, n. 4, p. 509–520, 2008.

PEAIRS, Daniel M; PARK, Gyuhae; INMAN, Daniel J. Title: Low Cost Impedance Monitoring Using Smart Materials. p. 9, .

QING, Xinlin; LI, Wenzhuo; WANG, Yishou; *et al.* Piezoelectric Transducer-Based Structural Health Monitoring for Aircraft Applications. **Sensors**, v. 19, n. 3, p. 545, 2019.

RAMADAN, K. S.; SAMEOTO, D.; EVOY, S. A review of piezoelectric polymers as functional materials for electromechanical transducers. **Smart Materials and Structures**, v. 23, n. 3, p. 033001, 1 mar. 2014.

RIBEIRO, Clarisse; COSTA, Carlos M.; MARTINS, Pedro; *et al.* Piezoelectric Polymers and Polymer Composites for Sensors and Actuators. In: **Reference Module in Materials Science and Materials Engineering**. [s.l.]: Elsevier, 2018, p. B9780128035818105000. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780128035818104990>>. Acesso em: 15 ago. 2022.

RUGINA, Cristian; ENCIU, Daniela; TUDOSE, Mihai. Numerical and experimental study of circular disc electromechanical impedance spectroscopy signature changes due to structural damage and sensor degradation. **Structural Health Monitoring**, v. 14, n. 6, p. 663–681, 2015.

SHIRUI WANG; CHAO YOU. A Circuit Design for Impedance-based Structural Health Monitoring. **Journal of Intelligent Material Systems and Structures**, v. 19, n. 9, p. 1029–1040, 2008.

SILVA DE FREITAS, Everaldo; GUIMARÃES BAPTISTA, Fabricio. Experimental analysis of the feasibility of low-cost piezoelectric diaphragms in impedance-based SHM applications. **Sensors and Actuators A: Physical**, v. 238, p. 220–228, 2016.

SOHN, Hoon; FARRAR, Charles R; HEMEZ, Francois; *et al.* A Review of Structural Health Monitoring Literature 1996 – 200. p. 7, .

TEBALDI, Adriano. DETECÇÃO DE FALHAS EM ESTRUTURAS INTELIGENTES USANDO ESTRATÉGIA EVOLUTIVA COM MECANISMOS DE AUTO-ADAPTAÇÃO. p. 7, 2005.

TEBALDI, Adriano; COELHO, Leandro dos Santos; LOPES JUNIOR, Vicente. Detecção de falhas em estruturas inteligentes usando otimização por nuvem de partículas: fundamentos e estudo de casos. **Sba: Controle & Automação Sociedade Brasileira de Automatica**, v. 17, n. 3, p. 312–330, 2006.

VAN DER AUWERAER, Herman; PEETERS, Bart. Sensors and systems for structural health monitoring. **Journal of Structural Control**, v. 10, n. 2, p. 117–125, 2003.

XU, Buli; GIURGIUTIU; VICTOR; A Low-Cost and Field Portable Electromechanical (E/M) Impedance Analyzer for Active Structural Health Monitoring, SOUTH CAROLINA UNIV COLUMBIA DEPT OF MECHANICAL ENGINEERING