

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA E**  
**INFORMÁTICA INDUSTRIAL**

**GUSTAVO GOMES KUHN**

**DISPOSITIVO FOTORREFRATIVO REVESTIDO DE MATERIAL**  
**COMPÓSITO PARA MEDIÇÃO SIMULTÂNEA DE VIBRAÇÃO E**  
**TEMPERATURA EM NÚCLEO DE TRANSFORMADORES**

**TESE**

**CURITIBA**

**2020**

**GUSTAVO GOMES KUHN**

**DISPOSITIVO FOTORREFRATIVO REVESTIDO DE MATERIAL  
COMPÓSITO PARA MEDIAÇÃO SIMULTÂNEA DE VIBRAÇÃO E  
TEMPERATURA EM NÚCLEO DE TRANSFORMADORES**

**Photorefractive device coated composite material for simultaneous  
measurement of vibration and temperature in transformers iron core**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), como requisito parcial para obtenção do título de “Doutor em Ciências” - Área de Concentração: Fotônica em Engenharia.

Orientador: Prof. Dr. Jean Carlos Cardozo da Silva

Coorientador: Prof. Dr. Kleiton de Moraes Sousa.

**CURITIBA**

**2020**



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Esta licença permite que outros distribuam, remixem, adaptem e criem a partir do seu trabalho, mesmo para fins comerciais, desde que lhe atribuam o devido crédito pela criação original.



GUSTAVO GOMES KUHN

**DISPOSITIVO FOTORREFRATIVO REVESTIDO DE MATERIAL COMPÓSITO PARA MEDIÇÃO SIMULTÂNEA DE VIBRAÇÃO E TEMPERATURA EM NÚCLEO DE TRANSFORMADORES**

Trabalho de pesquisa de doutorado apresentado como requisito para obtenção do título de Doutor Em Ciências da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Área de concentração: Fotônica Em Engenharia.

Data de aprovação: 27 de Outubro de 2020

Prof Jean Carlos Cardozo Da Silva, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Prof Cesar Augusto Dartora, Doutorado - Universidade Federal do Paraná (Ufpr)

Prof Marcos Vinicio Haas Rambo, Doutorado - Universidade Federal do Paraná (Ufpr)

Prof Sergio Vidal Garcia Oliveira, Doutorado - Fundação Universidade do Estado de Santa Catarina (Udesc)

Prof Valmir De Oliveira, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Documento gerado pelo Sistema Acadêmico da UTFPR a partir dos dados da Ata de Defesa em 18/11/2020.

Faço questão de dedicar esse trabalho a três gerações de mulheres:

... à minha mãe **Isolda**, que sempre acreditou no meu potencial, investiu na minha educação e principalmente zelou nos 172 dias em que estive nas estradas paranaenses;

... à minha esposa **Cintia**, que durante esses últimos 4 anos dividiu os esforços entre a criação de nossa filha e também o papel de mulher moderna que busca seus próprios objetivos profissionais, mas sobretudo, em nenhum momento esqueceu-se da *Família*;

... à minha filha **Pietra** que soube ser paciente, e mesmo assim, amar cada vez mais um pai que esteve temporariamente ausente de corpo durante 4 anos. Entretanto, espero recompensá-la com a mesma intensidade nos próximos 50 anos...

## AGRADECIMENTOS

Neste momento faltam palavras para expressar tamanha gratidão por todas as pessoas que contribuíram com este trabalho, não foram poucas, umas mais intensamente, umas efusivamente, umas timidamente, umas com opiniões certeiras, umas com sugestões que valeram pela discussão e amadurecimento geral, meu e do grupo de colegas. Mas principalmente agradeço pela amizade cultivada nesse período de 4 anos. Foram muitos novos amigos, que com certeza serão eternos. Me arrisco a citá-los pois nosso grupo é pequeno em número de pessoas, entretanto, grande em produção :) Em ordem alfabética: Alessandra, André, Bazzo, Cesar, Danilo, Eduardo, Galvão, Guilherme Dutra, Guilherme Weber, Igor, Jesse, Joel, Matheus, Otoniel, Rafael, Rosângela, Talita, Uilian, Victor, e todos os demais colegas de fotônica que tive a oportunidade de conviver. Também agradeço ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial (CPGEI).

Agradeço de forma mais do que especial, ao amigo de longa data, e que por 4 anos foi meu orientador, Prof. Dr. Jean Carlos Cardozo da Silva. Grata satisfação em poder trabalhar com o Jean, pois é uma pessoa do bem, correto, polido, dedicado ao trabalho e com uma motivação invejável para que tudo dê certo no tempo certo.

Um agradecimento ao Prof. Dr. Kleiton de Moraes Sousa pela coorientação do trabalho, por suas revisões certeiras nos artigos frutos desse trabalho e pelas muitas horas de ensaios experimentais no Campus Pato Branco da UTFPR. Também agradeço ao DAELE/PB pela cessão do laboratório de Máquinas Elétricas e ao PPGEE/PB que sempre cedeu gentilmente espaço e equipamentos para continuidade do trabalho.

Também gostaria de agradecer aos amigos Ricardo Antonelli, Otoniel da Rocha e Guilherme Pendiuk, pessoas que conheci no transcorrer do doutorado, mas parecia que já faziam parte da minha vida. A simplicidade, a confiança, e principalmente o companheirismo que tivemos deixou mais amena a distância da família. Vocês foram minha família em Curitiba. Obrigado!

E por fim, agradecer de uma forma indelével, pois nosso esforço de vida não acaba aqui, minha gratidão segue adiante: à minha esposa Cintia e aos meus filhos Pietra, Vinicius e Vivian. Espero que vocês três entendam algum dia que todos os momentos que não estive presente é uma ilusão de “ótica”, pois buscando o melhor ângulo entenderão que, mesmo longe, sempre pensei e continuo pensando e principalmente torcendo muito por vocês.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES).

“Talvez não tenha conseguido fazer o melhor,  
mas lutei para que o melhor fosse feito.

Não sou o que deveria ser,  
mas Graças a Deus, não sou o que era antes.”

*Marthin Luther King*

## RESUMO

KUHN, Gustavo Gomes. **Dispositivo fotorrefrativo revestido de material compósito para medição simultânea de vibração e temperatura em núcleo de transformadores**. 2020. 115 f. Tese (Doutorado em Ciências) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2020.

Este trabalho apresenta estudos sobre a identificação de vibrações mecânicas e temperatura originadas no núcleo de ferro de um transformador trifásico à seco. Diferentes componentes de frequência podem gerar perdas e danos por meio de vibrações mecânicas. A perda de isolamento provoca falhas como curtos-circuitos, que acabam gerando prejuízos às concessionárias de energia e principalmente aos consumidores finais. Diferentemente dos sensores elétricos comerciais, que são acoplados na carcaça externa do transformador, esse estudo propõe a aplicação de redes de Bragg em fibra ótica (FBG) como elementos sensores aplicados diretamente ao núcleo, monitorando de forma simultânea vibração e temperatura. Também comparados aos sensores elétricos tradicionais (*strain gages*), os sensores FBGs não sofrem interferência eletromagnética, podendo ser aplicados internamente ao transformador sem atenuações do sinal ótico. Além disso, monitora a vibração diretamente na principal fonte causadora, que é o núcleo de ferro. Como o sensor fica exposto a um ambiente hostil, um dispositivo em compósito reforçado de fibra de carbono foi projetado para proteger a fibra ótica. Os sensores óticos foram revestidos pelo compósito, que também tem a função de melhorar a sensibilidade à deformação do sensor. A geometria da peça tem um formato de mola que garante esse aumento na sensibilidade em aproximadamente 12,3 % para a componente de frequência fundamental mecânica de 120 Hz. Para a medição da temperatura e vibração foram utilizados dois sensores multiplexados com comprimentos de onda diferentes. A compensação da temperatura do sensor de deformação também foi realizada. Ensaios elétricos em um transformador trifásico à seco de 3 kVA foram realizados com diferentes tipos de cargas elétricas. A Função da Resposta em Frequência (FRF) foi utilizada para apresentação dos resultados de deformação e comparação das FRFs de sensores colados livremente no núcleo com os sensores embebidos em fibra de carbono. O dispositivo de engate rápido, nos testes experimentais, obteve uma relação média de incremento de sensibilidade de 32 % em relação ao sensor não encapsulado. Dessa forma, mostrou-se viável a aplicação direta no núcleo de ferro de transformadores trifásicos à seco.

**Palavras-chave:** Transformadores de distribuição e potência. Vibração no núcleo de ferro. Deformação dinâmica. Redes de Bragg em fibra ótica. Compósito reforçado em fibra de carbono.



## ABSTRACT

KUHN, Gustavo Gomes. **Photorefractive device coated composite material for simultaneous measurement of vibration and temperature in transformers iron core**. 2020. 115 p. Thesis (Doctorate in Science) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2020.

This work presents studies on the identification of mechanical vibrations and temperature originating in the iron core of a three-phase dry transformer. Different frequency components can generate losses and damages through mechanical vibrations. The loss of insulation causes major failures such as short circuits, which end up generating losses to energy concessionary and mainly to final consumers. Unlike commercial electrical sensors, which are attached to the transformer's external housing, this study proposes the application of Bragg gratings in optical fiber (FBG) as sensor elements applied directly to the core, simultaneously monitoring dynamic vibration and temperature. Also compared to traditional electrical sensors (*strain gages*), FBGs sensors do not suffer electromagnetic interference, and can be applied internally to the transformer without optical signal attenuation. In addition, it monitors vibration directly at the main causative source, which is the iron core. As the sensor is exposed to a hostile environment, a carbon fiber reinforced composite device is designed to protect the optical fiber. The optical sensors were coated by the composite, which also has the function of improving the sensitivity to dynamic deformation of the sensor. The part geometry has a spring shape that guarantees this increase in sensitivity by approximately 12.3 % for the 120 Hz mechanical fundamental frequency component. For the measurement of temperature and vibration, two multiplexed sensors with different wavelengths were used. The temperature compensation of the strain sensor was also performed. Electrical tests on a 3 kVA three-phase dry transformer were carried out with different types of electrical loads. The Frequency Response Function (FRF) was used to present the dynamic deformation results and compare the FRFs of sensors glued freely to the core with the embedded sensors. The quick coupling device, in the experimental tests, obtained an average sensitivity increase ratio of 32 % in relation to the non-encapsulated sensor. Thus, direct application to the iron core of three-phase dry transformers was shown to be feasible.

**Keywords:** Distribution and power transformers. Iron core vibration. Dynamic strain. Fiber Bragg gratings. Carbon fiber reinforced polymer.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Explosão em um transformador de subestação da Copel no município de Marechal Cândido Rondon. . . . .	29
Figura 2 – Típico padrão de falhas em transformadores. Curva em formato de banheira.	32
Figura 3 – Percentagem de cada tipo de falhas apresentadas em estudo num universo de 188 transformadores. . . . .	34
Figura 4 – (a) Superfície externa de um transformador com pontos de medição usando sensores acelerômetros piezoelétricos. (b) Localização das falhas nos enrolamentos. . . . .	37
Figura 5 – Faixa de frequência e suas respectivas influências do núcleo e enrolamentos de alta ou baixa tensão na FRF do transformador. . . . .	39
Figura 6 – Distribuição de vibração mecânica em milímetros no núcleo de um transformador por meio de simulação de elementos finitos. . . . .	40
Figura 7 – (a) Comparação da varredura em resposta em frequência em um das fases de um transformador de 60 MVA, 400 kV, antes e depois de uma falha catastrófica de curto-circuito. (b) Foto da falha ocorrida e que danificou completamente o transformador . . . . .	40
Figura 8 – Resultado da medição em SFRA comparando as curvas de frequência dos enrolamentos de alta tensão de um transformador trifásico, falha em alta frequência . . . . .	41
Figura 9 – Resultado de testes de curto-circuito, evidencia a semelhança entre sinais correlatos de vibração nos enrolamentos . . . . .	42
Figura 10 – Sinal de vibração no domínio do tempo e espectro de frequências para diferentes carregamentos ao eixo do motor . . . . .	43
Figura 11 – Princípio de funcionamento de um sensor FBG. . . . .	44
Figura 12 – Diferentes redes de Bragg, espectro refletido; (a) uniforme; (b) aperiódica ou <i>chirped</i> ; (c) inclinada ou <i>tilted</i> . . . . .	45
Figura 13 – Rede Bragg sob influência de temperatura e deformação. . . . .	46
Figura 14 – Deslocamento espectral quando a rede de Bragg sofre influência de tração ou compressão. . . . .	47
Figura 15 – (a) Revestimento de um polímero sobre o sensor, e (b) dois polímeros diferentes revestindo o mesmo sensor . . . . .	49
Figura 16 – (a) Espectro óptico para revestimento de um polímero e em (b) espectro para dois polímeros diferentes . . . . .	49
Figura 17 – Sensor projetado em um filme fino de polímero e posicionamento em partes dos enrolamentos de um transformador de 110 kV . . . . .	50
Figura 18 – (a) Projeto estrutural do sensor e (b) imagem real destacando a dimensão do dispositivo . . . . .	51
Figura 19 – (a) Simulação em elementos finitos, deformação da superfície gráfica. (b) Posicionamento do sensor em uma prensa hidráulica nos testes estáticos . . . . .	51
Figura 20 – (a) Dimensões e posição dos sensores FBG. (b) Encapsulamento em gel e polímero. (c) Foto em tamanho real e (d) Curva de resposta em frequência, comparação resposta óptica FBG e mecânica martelo de impacto . . . . .	52
Figura 21 – Ilustração do espectro transmitido em forma de filtro passa-banda de um sensor de temperatura usando dois comprimentos de onda . . . . .	54

Figura 22 – Em (a) o sinal de saída de um fotodiodo mostrando o espectro refletido de 4 picos que correspondem aos comprimentos de onda distribuídos, e (b) o sinal óptico multiplexado de temperatura interna do transformador, de sensores distribuídos nos enrolamentos, distribuição espacial de temperatura . . . . .	54
Figura 23 – Tubo capilar de aço inoxidável usado no encapsulamentos dos sensores FBG, dentro de uma barra do estator de um gerador de potência . . . . .	55
Figura 24 – Em (a) tubo de aço inoxidável selado para encapsulamentos dos sensores FBG, dentro das ranhuras de um motor de indução. Em (b) vista em corte do motor mostrando o posicionamento dos conjuntos de sensores e (c) efeito do aumento da potência na proporcionalidade com a temperatura do estator . . .	56
Figura 25 – Resultados de temperatura do estator, monitoramento de 23h para seis transdutores ópticos . . . . .	56
Figura 26 – Padrão periódico gravado em uma fibra óptica por meio de máscara de fase .	57
Figura 27 – Configuração experimental do dispositivo de fibra de carbono com sensores ópticos embarcados. Clipe posicionado diretamente no núcleo do transformador. Conexões óptica e rede local . . . . .	59
Figura 28 – Foto do núcleo do transformador em destaque para a superfície lateral criada pela sobreposição irregular das chapas justapostas. . . . .	61
Figura 29 – Foto do transformador com sensor FBG colado transversalmente ao seu núcleo. A cola utilizada foi de base epóxi. . . . .	63
Figura 30 – Primeiro clipe projetado, face dos sensores rígida. (a) Simulação de análise estática de deformação. Geometria sem cortes na face do sensor. (b) Foto da estrutura do clipe projetada e construída em CFRP. Faces inteiriças e alta rigidez mecânica. . . . .	65
Figura 31 – Simulação de análise estática de deformação. Geometria com vazados paralelos.	65
Figura 32 – Simulação de análise estática de deformação. Geometria em formato de mola	66
Figura 33 – Estrutura final adotada (a) Método de elementos finitos. Força externa aplicada ao clipe e número de nós e elementos. (b) Simulação de análise estática de deformação. Geometria em formato de mola com 3 vazados. Estrutura de aspecto final do dispositivo. . . . .	67
Figura 34 – Análise da função da resposta em frequência do clipe inteiriço de CFRP e variação da espessura do clipe, com 1 mm em (a), 2 mm em (b) e 3 mm em (c).	68
Figura 35 – Molde do núcleo em alumínio usado para fabricação dando o formato de clipe. (a) Etapa de cura finalizada, seguinte desmoldar e retificar. (b) Clipe geometria final de engate rápido . . . . .	70
Figura 36 – Em (a) os dois sensores posicionados e colados em um sulco na camada de fibra de carbono, (b) o formato em mola do clipe e (c) clipe formato final com camada protetora dos sensores . . . . .	71
Figura 37 – Ensaio de banho térmico com o sensor de temperatura (a) e deformação (b) encapsulados no compósito de fibra de carbono. Reta de ajuste linear e coeficiente de correção para ambos os sensores ópticos. . . . .	72
Figura 38 – Em (a) CPs sendo preparados no formato de gravata. Em (b) a máquina de tração e (c) os CPs pós ensaios, todos rompidos. . . . .	74
Figura 39 – Ensaio de tração mecânica. Curva de estiramento de corpos de prova até o ponto de ruptura . . . . .	75
Figura 40 – Realização de ensaio experimental Laboratório de Vibração e Som (LAVIBS-UFPR). (a) Acoplamento do clipe de CFRP ao <i>shaker</i> (b) Atuadores posicionados, <i>shaker</i> , acelerômetro e sensor FBG de deformação. . . . .	78

Figura 41 – Resposta harmônica do clipe. (a) resposta em FEM, em (b) resposta do martelo de impacto e (c) resposta do sensor óptico embarcado . . . . .	79
Figura 42 – Ensaio experimental de deformação. Resposta em frequência com transformador (a) à vazio, (b) carga linear e (c) carga não-linear . . . . .	81
Figura 43 – Ensaio experimental de temperatura, dois pontos de interesse em 8 e 16 min, leitura do sensor e pirômetro laser . . . . .	82
Figura 44 – Dados do fabricante <i>Fluke</i> sobre a distância focal de medição de temperatura de objetos . . . . .	83
Figura 45 – Circuito esquemático do transformador à vazio. . . . .	84
Figura 46 – Transformador submetido a carga à vazio. Em (a) corrente elétrica, (b) FRF de deformação do sensor óptico não encapsulado e (c) FRF de deformação do sensor óptico embarcado na fibra de carbono . . . . .	85
Figura 47 – Circuito esquemático do transformador submetido a carga puramente resistiva. . . . .	86
Figura 48 – Transformador submetido a carga linear puramente resistiva. Em (a) corrente elétrica (b) FRF de deformação do sensor óptico não encapsulado e (c) FRF de deformação do sensor óptico encapsulado na fibra de carbono . . . . .	86
Figura 49 – Circuito elétrico do transformador ligado a um retificador de meia-onda, filtro e carga. . . . .	87
Figura 50 – Transformador submetido a carga não-linear RC. Em (a) corrente elétrica, (b) a FRF de deformação do sensor óptico não encapsulado e em (c) a FRF de deformação do sensor óptico embarcado na fibra de carbono. . . . .	88
Figura 51 – Patente: Transformador, em (a) vista lateral e (b) vista frontal . . . . .	114
Figura 52 – Patente: Em (a) transformador e em (b) detalhe dos sensores . . . . .	114
Figura 53 – Patente: grampo de engate rápido . . . . .	115
Figura 54 – Patente: faces em formato de mola, aumento da sensibilidade do sensor de deformação . . . . .	115

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Número de consumidores atendidos pela COPEL no estado do Paraná . . .	27
Tabela 2 – Número de equipamentos no sistema de distribuição COPEL . . . . .	28
Tabela 3 – Causas típicas de falhas em transformadores . . . . .	32
Tabela 4 – Faixa de frequência usada na interpretação da SFRA . . . . .	41
Tabela 5 – Especificações gerais dos equipamentos e parâmetros ópticos das fibras ópticas utilizadas no projeto . . . . .	58
Tabela 6 – Propriedades da fibra de carbono em epóxi UD Prepreg e características que foram utilizadas na simulação em FEM . . . . .	62
Tabela 7 – Comparação de deformações máximas FEM entre modelos de clipe . . . . .	68
Tabela 8 – Características do ensaio de banho térmico do sensor FBG de temperatura .	71
Tabela 9 – Valores médios produzidos no ensaio longitudinal de tração mecânica. . . .	76
Tabela 10 – Intensidade da frequência sob diferentes condições de cargas elétricas . . .	89

## LISTA DE SIGLAS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ArF	Fluoreto de Argônio
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
CA	Corrente Alternada
CFRP	<i>Carbon Fiber Reinforced Polymer</i> (Compósito Reforçado de Fibra de Carbono)
CIGRE	Conselho Internacional de Grandes Sistemas Elétricos
CNC	<i>Computer Numeric Control</i> (Controle Numérico Computadorizado)
COPEL	Companhia Paranaense de Energia
CP	Corpos de prova
CPGEI	Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial
DP	Descarga Parcial
DTS	Sensoriamento Distribuído de Temperatura
FBG	<i>Fiber Bragg Grating</i> (Rede de Bragg em Fibra)
FEM	<i>Finite Element Method</i> (Método de Elementos Finitos)
FO	Fibra Ótica
FPF	<i>Fabry-Perrot Filter</i> (Filtro Fabry-Perrot)
FRA	<i>Frequency Response Analysis</i> (Análise da Resposta em Frequência)
FRF	<i>Frequency Response Function</i> (Função da Resposta em Frequência)
IR	<i>Infra-Red</i> (Infravermelho)
INPI	Instituto Nacional de Propriedade Industrial
LAVIBS	Laboratório de Vibração e Som
MEMS	<i>Microelectromechanical Systems</i> (Sistemas Microeletromecânicos)
NDT	<i>Non-destructive testing</i> (Testes não-destrutivos)
SFRA	<i>Sweep Frequency Response Analysis</i> (Análise de Varredura de Resposta em Frequência)
SHM	<i>Structural Health Monitoring</i> (Monitoramento da Integridade Estrutural)
SM130	Modelo de interrogador ótico
SMF	<i>Standard Monomode Fiber</i> (Fibra Monomodo Padrão)
TECPAR	Instituto de Tecnologia do Paraná
UV	Ultravioleta
UFPR	Universidade Federal do Paraná
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná

## LISTA DE SÍMBOLOS

### LETRAS LATINAS

$a_e$	Força da aceleração nos enrolamentos	[m/s <sup>2</sup> ]
$a_n$	Força da aceleração no núcleo	[m/s <sup>2</sup> ]
$A$	Área da seção transversal	[m <sup>2</sup> ]
$B$	Densidade de fluxo magnético	[T]
$B_S$	Densidade de fluxo magnético de saturação	[T]
$\vec{d}$	Vetor deslocamento de uma mola	[m]
$E$	Módulo de elasticidade	[N/m <sup>2</sup> ]
$F_x$	Força elástica na direção x	[N]
$F$	Força eletrodinâmica dos enrolamentos	[N]
$i$	Corrente Elétrica no enrolamento	[A]
$I$	Corrente elétrica	[A]
$I_m$	Corrente elétrica de magnetização	[A]
$k$	Constante elástica	[N/m]
$l$	Comprimento da rede de Bragg	[m]
$l_0$	Comprimento inicial	[m]
$m$	Ordem do padrão periódico de gravação da fibra óptica	
$n$	Índice de refração do núcleo da fibra	
$n_1$	Índice de refração do núcleo	
$n_2$	Índice de refração da casca	
$n_{eff}$	Índice de refração efetivo no núcleo da fibra	
$p$	Condição inicial de vibração do enrolamento	
$p_e$	Constante elasto-óptica	[nm]
$p_{11}$	Componente do tensor elasto-óptico	[nm]
$p_{12}$	Componente do tensor elasto-óptico	[nm]
$S$	Área da seção transversal do núcleo	[m <sup>2</sup> ]
$t$	Tempo	[s]

$T_g$	Temperatura de transição vítrea	[°C]
$U_1$	Tensão elétrica no primário	[V]
$U_2$	Tensão elétrica no secundário	[V]

## LETRAS GREGAS

$\alpha_n$	Coefficiente termo-óptico	[°C <sup>-1</sup> ]
$\alpha_\Lambda$	Coefficiente de expansão térmica	[nm·°C <sup>-1</sup> ]
$\beta$	Defasagem de corrente	[°]
$\Delta l$	Varição de comprimento	[m]
$\Delta L$	Varição de deformação da fibra	[m]
$\Delta_n$	Varição no índice de refração	
$\Delta\lambda_B$	Varição no comprimento de onda de Bragg	[nm]
$\Delta\lambda_\epsilon$	Varição no deslocamento do comprimento de onda	[nm]
$\Delta T$	Varição de temperatura da fibra	[°C]
$\epsilon$	Deformação	[μ $\epsilon$ ]
$\epsilon_S$	Taxa de saturação de magnetostricção	
$\phi$	Fluxo magnético induzido	[Wb]
$\lambda_B$	Comprimento de onda de Bragg	[nm]
$\lambda$	Modulação periódica do índice de refração	[nm]
$\Lambda_{pm}$	Modulação periódica gravada no núcleo da fibra óptica	[nm]
$\partial n / \partial l$	Propriedade elasto-óptica da fibra	[nm <sup>-1</sup> ]
$\partial n / \partial T$	Propriedade termo-óptica da fibra	[°C <sup>-1</sup> ]
$\partial \Lambda / \partial l$	Deformação mecânica da fibra	[nm·nm <sup>-1</sup> ]
$\partial \Lambda / \partial T$	Deformação térmica da fibra	[nm·°C <sup>-1</sup> ]
$\nu$	Razão de Poisson	
$\omega$	Frequência angular	[rad]
$\sigma$	Tensão mecânica da fibra óptica	[Pa]
$\theta_o$	Ângulo da rede em relação ao eixo ótico	[°]
$\varphi$	Ângulo da rede em relação ao eixo ótico	[°]



## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> . . . . .	<b>18</b>
1.1	MOTIVAÇÃO . . . . .	22
1.2	OBJETIVOS . . . . .	22
1.2.1	Objetivo Geral . . . . .	22
1.2.2	Objetivos Específicos . . . . .	23
1.3	CONTRIBUIÇÕES . . . . .	23
1.4	ORGANIZAÇÃO DA TESE . . . . .	25
<b>2</b>	<b>ANÁLISE DE FALHAS EM TRANSFORMADORES EMPREGANDO SENSORES A FIBRA ÓPTICA</b> . . . . .	<b>27</b>
2.1	PRINCÍPIO DA VIBRAÇÃO MECÂNICA NO NÚCLEO E ENROLA- MENTOS . . . . .	29
2.2	PRINCIPAIS FALHAS EM TRANSFORMADORES . . . . .	31
2.3	ANÁLISE DA RESPOSTA EM FREQUÊNCIA DE VIBRAÇÃO DE TRANSFORMADORES . . . . .	38
2.4	REDES DE BRAGG EM FIBRAS ÓPTICAS . . . . .	43
2.4.1	Rede de Bragg em Fibra Óptica como Elemento Sensor . . . . .	45
2.4.2	Sensores FBGs encapsulados em Compósitos Aplicados a Máquinas Elétricas . . . . .	48
2.4.3	Monitoramento de Temperatura em Sistemas de Energia com Sensores Ópticos . . . . .	53
<b>3</b>	<b>PROJETO, CARACTERIZAÇÃO E CALIBRAÇÃO DO SENSOR EN- CAPSULADO EM MATERIAL COMPÓSITO</b> . . . . .	<b>57</b>
3.1	GRAVAÇÃO DE SENSORES EM FIBRA ÓPTICA . . . . .	57
3.2	CONFIGURAÇÃO EXPERIMENTAL PARA OS ENSAIOS NO TRANSFORMADOR . . . . .	59
3.3	DESENVOLVIMENTO DE UM CLIPE DE CFRP PARA ENGATE RÁPIDO . . . . .	60
3.3.1	Simulação em Elementos Finitos . . . . .	60
3.3.2	Processo de Fabricação do clipe de CFRP . . . . .	69
3.3.3	Ensaio de Calibração de Temperatura . . . . .	71
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> . . . . .	<b>73</b>
4.1	LEVANTAMENTO DE PARÂMETROS MECÂNICOS DO CFRP . . . . .	74
4.2	RESPOSTA EM FREQUÊNCIA HARMÔNICA DO CLIPE . . . . .	77
4.3	ENSAIO DE DEFORMAÇÃO DO NÚCLEO DO TRANSFORMADOR . . . . .	80
4.4	ENSAIO TÉRMICO NO TRANSFORMADOR . . . . .	81
4.5	RESPOSTA EM FREQUÊNCIA DE VIBRAÇÃO SOB VARIAÇÃO DE CARGA . . . . .	83
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS</b> . . . . .	<b>90</b>
5.1	CONCLUSÕES . . . . .	90
5.2	TRABALHOS FUTUROS . . . . .	93
	<b>REFERÊNCIAS</b> . . . . .	<b>94</b>

	<b>APÊNDICES</b>	<b>104</b>
	<b>APÊNDICE A – PUBLICAÇÕES RESULTANTES DESTA TESE . . .</b>	<b>105</b>
A.1	ARTIGOS PUBLICADOS EM PERIÓDICOS . . . . .	105
A.2	ARTIGOS PUBLICADOS EM ANAIS DE CONGRESSOS INTER- NACIONAIS . . . . .	105
A.3	ARTIGOS APRESENTADOS EM CONGRESSOS INTERNACIONAIS	105
A.4	DEPÓSITO DE PATENTE . . . . .	106
	<b>APÊNDICE B – DESCRIÇÃO DA PATENTE . . . . .</b>	<b>107</b>
B.1	DISPOSITIVO FOTORREFRATIVO REVESTIDO DE MATERIAL COMPÓSITO PARA MEDIÇÃO SIMULTÂNEA DE VIBRAÇÃO E TEMPERATURA EM NÚCLEO DE TRANSFORMADORES . . . . .	107
B.2	FIGURAS DA DESCRIÇÃO DA PATENTE . . . . .	114

## 1 INTRODUÇÃO

Os transformadores de potência são partes do sistema elétrico de transmissão e distribuição e têm grande importância ao setor elétrico, além de um alto custo financeiro. Por exemplo, em transformadores de distribuição na faixa de 30 a 300 kVA, o custo médio por kVA é de R\$ 84,40 segundo (MAK *et al.*, 2006). Em números da Companhia Paranaense de Energia (COPEL) os custos de implantação do sistema de distribuição, apenas referindo-se a transformadores, é de mais de 1 bilhão de reais. Quando ocorre algum tipo de falha ou defeito no equipamento, o sistema elétrico que é interligado, gera uma descontinuidade no fornecimento de energia. Esse tipo de interrupção pode acarretar problemas técnicos e perdas financeiras às concessionárias de energia e principalmente aos consumidores finais, (COPEL, 2019a). Dados da própria concessionária Copel mostram um número significativo de transformadores de distribuição que atendem aos consumidores paranaenses, aproximadamente 438.951 transformadores em setembro de 2019 (COPEL, 2019b).

No mesmo período de 2019, a Copel já atendia aproximadamente 4,7 milhões de unidades consumidoras apenas no estado do Paraná, conforme (COPEL, 2019a). A companhia também relata que efetua em média, mais de 70 mil novas ligações a cada ano, atendendo praticamente 100 % dos domicílios nas áreas urbanas e passa de 90 % nas regiões rurais do estado paranaense (COPEL, 2019a). Essa característica faz com que as concessionárias de energia tentem melhorar as técnicas de operação, diagnósticos e de manutenção dos equipamentos do sistema elétrico de geração, transmissão e distribuição. A necessidade ao atendimento das normas regulamentadoras exigidas pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) faz da confiabilidade desses equipamentos uma necessidade importante às concessionárias de energia (ANEEL, 2010), tornando o monitoramento, diagnóstico e manutenção itens importantes para a predição de falhas (Ribeiro *et al.*, 2009).

Em monitoramento de máquinas elétricas, problemas relacionados a sobretensão e curto-circuito são comuns em sistemas de potência, sobretudo, são os maiores causadores de falhas em equipamentos, como os transformadores elétricos. Conforme a gravidade, esses eventos podem causar deformações nos enrolamentos ou núcleo, causando falhas subsequentes ao transformador. Há casos também, que manipulações ou instalações mal executadas causam danos iniciais menores, mas ao longo dos anos potencializam as falhas elétricas ou estruturais, conforme apontam os autores (RAGAVAN; SATISH, 2008; DICK; ERVEN, 1978; LEIBFRIED; FESER,

1999). Todas as máquinas elétricas, sejam elas rotativas ou estacionárias, geram vibração e calor em seu funcionamento normal, levando a um processo contínuo de deterioração, principalmente de partes da isolação, ocasionando falhas elétricas ou mecânicas de maior intensidade, de acordo com Rao (2008). Para o monitoramento da vibração e temperatura, diferentes tipos de sensores são empregados, dentre os quais: *strain gages*, piezoelétricos, sensores de corrente de Foucault, sistemas micro-eletromecânicos (MEMS - *Microelectromechanical Systems*), termistores e sensores a fibra óptica, conforme Cai *et al.* (2012).

No caso de transformadores elétricos, as vibrações mecânicas são originadas nos enrolamentos e núcleo de ferro laminado. No núcleo, a vibração consiste do efeito da magnetostricção e do espaço de ar entre as chapas justapostas. Nos enrolamentos, a vibração é gerada pela força de Lorenz causada pela correlação entre o fluxo disperso e a corrente nos enrolamentos. Transformadores com algum tipo de vibração mecânica anormal estão sujeitos a componentes de frequência diferentes da fundamental e harmônicos conhecidos, gerando perdas e sofrendo danos irreparáveis ao equipamento. O deslocamento dos enrolamentos e anormalidades vibratórias no núcleo podem ser indicativos de vibrações atípicas, em que o isolamento do equipamento pode estar com algum defeito (KITAGAWA *et al.*, 2010). Shengchang *et al.* (2001) usou um sensor piezoelétrico acoplado na carcaça externa de metal de um transformador, desta maneira, conseguiu identificar as componentes das frequências fundamentais e seus múltiplos harmônicos, em torno de 2 kHz, entretanto, com baixa sensibilidade. Bagheri e Phung (2016) usaram a técnica de análise de resposta em frequência (FRA) para determinar uma falha de curto-circuito que ocorreu nos enrolamentos devido à deterioração do isolamento causado por vibrações mecânicas. Uma leitura mais direta foi realizada por (MELO *et al.*, 2019), os autores usaram sensores FBG de pressão colados nos enrolamentos para um monitoramento estático e dinâmico no afrouxamento dos enrolamentos devido a curto-circuitos no transformador, e correntes de partida (*in rush*).

Um dos problemas que ocorre em medições externas (carcaça do transformador) são os pontos de fixação dos sensores, podendo haver atenuação do sinal de sensores elétricos convencionais, devido aos sistemas de resfriamento (água ou óleo), além de dispositivos adicionais ao transformador que também podem gerar alguma vibração diferente da vibração normal gerada pelas fontes principais. Quando um transformador está à vazio, as forças eletrodinâmicas são praticamente ausentes nos enrolamentos, por isso as vibrações mecânicas existentes nessa condição são atribuídas exclusivamente ao núcleo e a sua própria magnetização. Já com carga elétrica, ambos o núcleo e enrolamentos produzem vibração mecânica. Quando correntes de falta

ocorrem, forças mecânicas podem deformar os enrolamentos e até mesmo partes da estrutura do transformador, segundo Shengchang *et al.* (2001). Para resolver problemas advindos da medição externa como, por exemplo, a atenuação do sinal devido ao óleo, são usados amplificadores estruturais de formas e geometrias variadas juntamente com os sensores FBGs embarcados em sua estrutura. O foco principal de muitas pesquisas em relação a utilização de sensores FBGs em geral, tem sido produzir sensores com a maior sensibilidade e com maior capacidade de multiplexação (QIAO *et al.*, 2017). Para aplicações de frequência abaixo de 500 Hz, por exemplo na indústria de controle de processos, esse não é um fator muito significativo. Enquanto que conhecer a faixa dinâmica correta de medição é importante, técnicas distintas de encapsulamento, capacidade de operar em redes interligadas são fatores mais significativos, conforme (ALLWOOD *et al.*, 2017). Um bom exemplo disso, Li *et al.* (2018) desenvolveu um sensor FBG de deformação com um incremento de sensibilidade, em torno de  $6,2 \text{ pm}/\mu\epsilon$ , que consiste em um substrato de aço inoxidável com uma determinada geometria. Essa característica está sendo muito difundida nos dias de hoje. Além disso, essas estruturas tem uma faixa útil ou linear de frequência elevada de alguns Hz até alguns kHz, podendo ser aplicadas em muitas situações, pois são facilmente adesivadas ou coladas a muitos tipos de superfícies (LI *et al.*, 2018).

Geralmente, em grande parte das indústrias tem em suas plantas fabris máquinas elétricas, motores, geradores, transformadores, de acordo com (GARG *et al.*, 2001). Aplicações onde os sensores são embarcados em equipamentos ou fixados internamente a algum tipo de estrutura é um tema bastante disseminado. A utilização de dispositivos sensores acoplados a materiais compósitos é propícia, como em aplicações de: aviação, transportes, aeroespaciais, esportes a motor, e principalmente na indústria de engenharia civil. Materiais compósitos têm características mecânicas semelhantes às do aço, entretanto podem ser facilmente moldados ou projetados para diferentes situações, e com a vantagem de ser um material isolante. Aplicações cujo objetivo é encapsular sensores ópticos na estrutura do compósito são promissoras, justamente pela robustez mecânica que o compósito oferece ao sensor. Compósitos reforçados em fibra de carbono (CFRP - *Carbon Fiber Reinforced Polymer*) podem ser aplicados onde outros materiais sofrem com as condições severas do ambiente fabril ou de qualquer natureza a que esteja submetido. É muito comum usar sensores ópticos para a identificação de vibração, deformação e/ou temperatura em estruturas de grande porte, como em Dreyer *et al.* (2017). Monitorar, identificar e diagnosticar falhas em suas fases iniciais é importante, ou seja, conhecer e aplicar os conceitos de monitoramento da saúde estrutural (SHM - *Structural Health Monitoring*) ou

monitoramento da integridade estrutural. A técnica de SHM é útil para testes não-destrutivos (NDT - *Non-destructive testing*) (ZHENG *et al.*, 2015; BAPTISTA *et al.*, 2010; BETZ *et al.*, 2007). Balageas (2006) comenta que para um diagnóstico completo, é necessário detectar, identificar, localizar e avaliar falhas que afetam diretamente o desempenho da estrutura como um todo.

Identificar parâmetros como vibração, deformação, temperatura é importante para a aplicação do conceito de monitoramento da integridade estrutural. O diagnóstico por meio de ferramentas de monitoramento é necessário para prolongar a vida útil dos equipamentos. Uma boa ferramenta de diagnóstico é a Função da Resposta em Frequência (FRF - *Frequency Response Function*). É uma forma efetiva de detecção da operação normal e das anormalidades apresentadas pelo equipamento. Então, identificar cada FRF dos equipamentos é a chave para prevenir problemas elétricos e estruturais, como descreve (MITCHELL; WELSH, 2011). Os autores (LI; LI, 2010) realizaram um análise modal de vibração para os enrolamentos e isolamentos de um transformadores. Identificaram frequências naturais axiais e também cada modo vibracional do sistema usando Método de Elementos Finitos (FEM - *Finite Element Method*). Usar uma varredura em frequência de uma determinada faixa também pode-se determinar a função da resposta em frequência. Contin *et al.* (2011) e Ghani *et al.* (2012) mediram condições estruturais no núcleo e enrolamentos de transformadores usando análise de resposta em frequência pela varredura (SFRA - *Sweep Frequency Response Analysis*). Uma larga faixa foi adotada pelos autores, que compreende 20 Hz até 20 MHz. A detecção de vibração e deformação em enrolamentos sob condições de curto-circuito, analisando o espectro de frequências também foi relatada por (KUN *et al.*, 2014) e (ZHANG *et al.*, 2015). Cada faixa de frequência de vibração de um transformador indica a provável fonte causadora, de 0 até 1 kHz tem-se problemas principalmente relacionados com o núcleo, de 10 kHz e frequências superiores, os problemas estão associados com os enrolamentos. Em um intervalo abaixo de 10 kHz fenômenos eletromagnéticos são conectados com o núcleo e o circuito magnético. De 5 kHz a 500 kHz movimentos radiais relativos ocorrem entre os enrolamentos. Acima de 400 kHz deformações axiais ocorrem separadamente em cada enrolamento, descrito por (GHANI *et al.*, 2012). Kubiak (2006) identificou o efeito da magnetostricção em transformadores de potência. A frequência fundamental de 100 Hz foi investigada e também suas componentes foram observadas por meio de FEM. Em máquinas rotativas (SOUSA *et al.*, 2015) apresentaram estudo sobre identificação de vibração posicionando sensores FBGs internamente ao motor, entre dois dentes do estator,

apresentando como resultado um espectro de frequências, fundamental e harmônicas, na faixa de 60 a 240 Hz. Dreyer *et al.* (2017) apresentaram outra aplicação de sensores acoplados em máquinas rotativas, usaram sensores FBGs para medição simultânea de vibração e temperatura em um hidrogerador de 370 MVA, onde posicionaram os sensores ópticos em peças alongadas de polímero em seis diferentes barras do estator.

## 1.1 MOTIVAÇÃO

A motivação do estudo de identificação de vibrações e o seu monitoramento simultaneamente com a temperatura em núcleos de transformadores, principalmente os de distribuição, é reflexo da quantidade de equipamentos desse tipo que se tem em operação no sistema elétrico. Portanto, esta tese de doutorado visa identificar o comportamento de deformação e temperatura do núcleo de ferro de um transformador à seco de 3 kVA de potência. Foi criado um dispositivo de engate rápido para facilitar a instalação dos sensores ópticos. Esse dispositivo foi projetado em compósito de fibra de carbono reforçado (CFRP), onde os sensores ópticos são encapsulados ao dispositivo, que tem uma geometria adequada para facilitar sua instalação diretamente no núcleo do transformador. Análises em elementos finitos foram realizadas para determinar uma geometria que proporcionasse uma melhoria na sensibilidade do sensor óptico de deformação. Um sensor FBG para medição de temperatura foi adicionado a fibra óptica, de forma multiplexada. Ensaio térmicos de deformação são apresentados e discutidos. E por fim, ensaios elétricos foram conduzidos com diferentes cargas elétricas para validar os sensores de deformação e temperatura. A FRF de cada condição é apresentada comparando um sensor colado diretamente no núcleo com os sensores encapsulados no compósito de fibra de carbono. Os resultados mostram a capacidade do dispositivo de identificar componentes de vibração e seus harmônicos, bem como a realização da compensação da temperatura, eliminando o efeito da sensibilidade cruzada que há nos sensores FBGs.

## 1.2 OBJETIVOS

### 1.2.1 Objetivo Geral

Esta tese tem por objetivo a medição direta e simultânea de vibração e temperatura no núcleo de ferro de transformadores, usando redes de Bragg em fibra óptica encapsulados em um

dispositivo de engate rápido fabricado em compósito reforçado em fibra de carbono.

### 1.2.2 Objetivos Específicos

- a) Projetar por meio de simulação em elementos finitos uma geometria com capacidade de incrementar a sensibilidade do sensor FBG de deformação;
- b) Projetar uma estrutura de engate rápido, em fibra de carbono, onde os sensores ópticos são incorporados;
- c) Realizar ensaios elétricos no transformador com variação de carga elétrica, usando sensores ópticos colados ao núcleo e também sensores encapsulados no compósito;
- d) Apresentar a resposta em frequência mecânica da estrutura de fibra de carbono;
- e) Apresentação e discussão dos resultados de deformação e temperatura do núcleo de ferro do transformador;
- f) Apresentação, comparação e discussão dos resultados da resposta em frequência de deformação do núcleo de ferro submetido a cargas elétricas lineares e não lineares.

### 1.3 CONTRIBUIÇÕES

Como contribuições relevantes desta Tese de Doutorado, destaca-se a fabricação, caracterização e validação experimental de sensores ópticos baseados em redes de Bragg encapsulados em compósito reforçado de fibra de carbono para medição de deformação e temperatura de núcleo de ferro de transformadores elétricos, sendo feita de maneira não invasiva. Quando se opera com cargas não-lineares, característica normal da rede elétrica, há a geração de uma série de harmônicos elétricos, podendo provocar desbalanceamentos mecânicos elevados, estimulando vibração no núcleo e enrolamentos dos transformadores. Nessa situação, a inserção de sensores FBG diretamente no núcleo, proporcionarão leituras de vibração mais fiéis ao estado ou integridade do equipamento. No caso dos transformadores de distribuição, há uma preocupação no monitoramento dessas máquinas, porque existe um número bastante significativo, aproximadamente 439.000 transformadores de distribuição operando no Paraná, segundo a concessionária de energia Copel. Normalmente, quando ocorrem falhas por qualquer natureza, um número muito grande de consumidores pode ser atingido pelo corte no fornecimento. Usando o sensor FBG em formato de clipe de engate rápido espera-se prever anormalidades elétricas, mecânicas e térmicas



de maneira a antever problemas de maior ordem.

O trabalho também propôs uma metodologia de monitoramento diretamente no núcleo do transformador, ao invés dos tradicionais sensores elétricos *strain-gages* acoplados externamente à carcaça. Essa metodologia consistiu na criação de um dispositivo em fibra de carbono, capaz de encapsular os sensores FBGs e também ser acoplado ao núcleo do transformador. Esse tipo de material compósito, por suas características mecânicas e isolantes, favorece a instrumentação de máquinas elétricas (motores, geradores, transformadores). O dispositivo foi simulado e ensaiado experimentalmente, garantindo sensibilidade elevada ao sensor de deformação.

O sistema de instrumentação é multiparamétrico, principalmente aplicado para o monitoramento de vibração, deformação e temperatura. Para trabalhos futuros, é possível usar sensores quasi-distribuídos, e dessa forma, garantir um mapa térmico e vibracional do transformador.

O estudo apresentado nesta tese originou os seguintes artigos científicos listados em ordem de relevância:

1. **G. G. Kuhn**, K. M. Sousa, C. Martelli, C. A. Bavastrri and J. C. C. d. Silva, "Embedded FBG Sensors in Carbon Fiber for Vibration and Temperature Measurement in Power Transformer Iron Core," in **IEEE Sensors Journal**, vol. 20, no. 22, pp. 13403-13410, 15 Nov.15, 2020, doi: 10.1109/JSEN.2020.3005884.
2. **KUHN, Gustavo Gomes**; SOUSA, Kleiton de Moraes; GALVÃO, José Rodolfo; MARTELLI, Cicero; and DA SILVA, Jean Carlos Cardozo. "*Improving sensitivity of FBG strain sensor embedded in polymer attached at transformer core*", In: **IMOC 2019 - SBMO/IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronics Conference**, 2019, Aveiro. Proceedings of the 2019 SBMO/IEEE MTT-S. Piscataway, NJ, Estados Unidos: IEEE, 2019. v. único. p. 1-3.
3. **KUHN, Gustavo Gomes**; SOUSA, Kleiton de Moraes; DA SILVA, Jean Carlos Cardozo. "*Dynamic Strain Analysis of Transformer Iron Core with Fiber Bragg Gratings*", In: **Bragg Gratings, Photosensitivity and Poling in Glass Waveguides and Materials**, 2018, Zurich. Advanced Photonics 2018, v. único. p. JTU2A.74.

O estudo também resultou em uma patente de inovação depositada junto ao Instituto Nacional de Propriedade Industrial (INPI) em outubro de 2018, conforme informações:

- Título: “*Dispositivo fotorrefrativo revestido de material compósito para medição simultânea de vibração e temperatura em núcleo de transformadores*”.
- Número do Processo INPI: BR 10 2018 067921 0 - Outubro/2018.
- Autores/Inventores: **KUHN, Gustavo Gomes**; DA SILVA, Jean Carlos Cardozo; GALVÃO, José Rodolfo; MARTELLI, Cícero.

#### 1.4 ORGANIZAÇÃO DA TESE

O primeiro capítulo apresenta de forma introdutória o assunto principal e trabalhos atualizados relacionados a forma de medição de vibração, deformação e temperatura de núcleos de ferro de transformadores de distribuição e potência. Aborda também os assuntos de sensores ópticos em redes de Bragg e compósitos em fibra de carbono, material este, onde serão encapsulados os sensores FBGs.

O capítulo dois abordará uma revisão da literatura sobre funcionamento de transformadores e o princípio do aparecimento de vibração mecânica no seu núcleo e enrolamentos. Os sensores ópticos também serão detalhados e a forma como é medida a deformação e temperatura. Além disso, será apresentado como é necessário conhecer e reduzir a sensibilidade cruzada entre deformação e temperatura. Da mesma forma, a revisão expõe exemplos técnico-científicos sobre o monitoramento de temperatura em sistemas de energia elétrica. Igualmente serão apresentados modelos aplicados para o encapsulamento de sensores ópticos de deformação em compósitos de fibra de carbono. Para finalizar o capítulo, uma revisão de análise em resposta em frequência referenciando às respostas e análises de vibração que serão discutidas no capítulo de resultados.

No terceiro capítulo são apresentados os materiais e métodos e versará sobre o desenvolvimento do projeto, informações gerais e específicas sobre os sensores ópticos e a fibra óptica, além de dados de gravação dos sensores. Uma seção sobre simulação em elementos finitos será apresentada para delimitar as ações do projeto do clipe de engate rápido ao núcleo de ferro. Toda a etapa de fabricação em compósito reforçado de fibra de carbono será descrita. Ensaios de banho térmico definirão a calibração dos sensores ópticos. E por fim, a descrição do aparato experimental e a metodologia de medição de deformação e temperatura.

O capítulo 4, Resultados e Discussões, apresentará dados de simulações e testes experimentais realizados. A fabricação do clipe de engate rápido e a sua estrutura mecânica foi testada de três formas, em que a resposta em frequência do sistema foi apresentada na forma

de: simulação em FEM, resposta mecânica do martelo de impacto e resposta em frequência do sinal óptico. A resposta em frequência de deformação do núcleo de ferro é apresentada e discutida, bem como os resultados dos testes experimentais térmicos. Para concluir o capítulo, a apresentação dos testes experimentais elétricos em laboratório, representando os diversos tipos de cargas elétricas que um transformador é submetido quando em operação conectado a rede elétrica. A resposta em frequência é abordada e discutida, com suas componentes fundamental e harmônicas, mecânicas e elétricas.

Para finalizar, têm-se as conclusões desta tese e os trabalhos futuros para o desenvolvimento contínuo do assunto.

## 2 ANÁLISE DE FALHAS EM TRANSFORMADORES EMPREGANDO SENSORES A FIBRA ÓPTICA

Este capítulo apresenta uma revisão da literatura sobre transformadores e seus principais componentes, principais falhas e técnicas de instrumentação óptica para monitoramento de vibração e temperatura. Sobre monitoramento da integridade estrutural de transformadores será apresentado como surgem as vibrações mecânicas e pontos de altas temperaturas. As vibrações mecânicas, principalmente originadas no núcleo de ferro e enrolamentos, acarretam falhas elétricas e mecânicas que serão apresentadas. Técnicas atuais que monitoram e analisam a vibração e temperatura de operação da máquina serão vistos. A aplicação de técnicas de sensoriamento óptico utilizando sensores encapsulados em materiais compósitos também será abordada, no intuito da proteção/preservação do sensor FBG, protegendo-o mecanicamente ou buscando melhoramento da sua sensibilidade.

Conforme comentado no Capítulo 1, a motivação do estudo é a identificação de vibrações e anomalias de temperatura que influenciem no funcionamento do transformador. Para exemplificar, são apresentados alguns dados estatísticos que uma concessionária de energia brasileira tem em sua rede de distribuição. A Companhia Paranaense de Energia - Copel atua em 10 estados brasileiros e praticamente todos os municípios paranaenses com uma participação nacional de 6 %. O número de consumidores atendidos no Paraná estão divididos nas seguintes categorias conforme a Tabela 1. Esses números resumem a relação de unidades consumidoras paranaenses em setembro de 2019, totalizando aproximadamente 4,7 milhões.

**Tabela 1 – Número de consumidores atendidos pela COPEL no estado do Paraná**

<b>Nº de consumidores (em milhares)</b>	<b>Set/2019</b>
Residencial	3.808
Industrial	73
Comercial	405
Rural	351
Outras	58
<b>TOTAL</b>	<b>4.695</b>

**Fonte: Adaptada de COPEL (2019a) - Setembro de 2019**

O sistema de distribuição da Copel é formado por uma série de equipamentos e esses dados estão apresentados na Tabela 2. A informação principal e relevante neste momento, é o número de transformadores de distribuição (438.951), que demonstram o potencial de aplica-

bilidade de produtos de monitoramento das condições de operação desse tipo de equipamento elétrico.

**Tabela 2 – Número de equipamentos no sistema de distribuição COPEL**

<b>Equipamentos</b>	<b>Quantidade</b>
Número de subestações	371
Potência instalada (MVA)	11.182,6
Redes de distribuição (km)	199.325,5
Total de postes de distribuição	3.037.755
<b>Número de transformadores de distribuição</b>	<b>438.951</b>
Potência instalada em transformadores de distribuição (MVA)	13.694,5

**Fonte: Adaptada de COPEL (2019b) - Setembro de 2019**

Mak *et al.* (2006) relatam que transformadores convencionais de distribuição tem um custo médio aproximado de R\$ 84,40 por kVA. Normalmente a potência nominal para transformadores de distribuição está na faixa de 30 a 300 kVA, já os superiores a 300 kVA até 5.000 MVA são classificados como transformadores de potência. Usando transformadores verdes<sup>1</sup>, esse custo por kVA pode ser reduzido a R\$ 53,40 devido às dimensões reduzidas e características do fluido isolante a base de éster natural e biodegradável (MAK *et al.*, 2006). A Figura 1 mostra uma situação real ocorria em dezembro de 2018, onde um transformador de uma subestação da Copel, no município de Marechal Cândido Rondon, explodiu devido a falha de curto-circuito deixando aproximadamente 21.600 unidades consumidoras sem energia em 6 municípios da região.

Quando se analisam essas informações da Tabela 2 com os dados de potência instalada em transformadores de distribuição em operação da Copel, 13.694,5 MVA, chega-se a uma cifra de mais de 1 bilhão de reais apenas com o custo de aquisição dos transformadores. Não estão sendo contabilizados os números de transformadores de indústrias e consumidores residenciais (edifícios e condomínios). Esses dados salientam a necessidade de monitoramento e manutenção desse tipo de equipamento, pois substituições são dispendiosas e a falta delas pode acarretar em falhas elétricas ou mecânicas que afetam o fornecimento de energia.

<sup>1</sup> O Transformador Verde® é um transformador de distribuição que utiliza óleo isolante vegetal biodegradável, construído com estrutura otimizada de forma a aproveitar os benefícios térmicos e físico-químicos deste óleo.

**Figura 1 – Explosão em um transformador de subestação da Copel no município de Marechal Cândido Rondon.**



**Fonte: COPEL (2020)**

## 2.1 PRINCÍPIO DA VIBRAÇÃO MECÂNICA NO NÚCLEO E ENROLAMENTOS

A vibração mecânica é um problema recorrente em máquinas de grande porte e essencialmente causa falhas na isolação do transformador, e origina-se principalmente no núcleo de ferro, nos enrolamentos e partes da refrigeração, relatado por (ZHANG *et al.*, 2018). No núcleo de ferro, a vibração é originada pelo efeito da magnetostricção<sup>2</sup> e a excitação do ar existente entre as chapas justapostas resulta em pequenas alterações de dimensão do próprio núcleo. Nos enrolamentos a vibração ocorre devido a força de Lorentz<sup>3</sup> causada pela interação entre a dispersão do fluxo magnético e a corrente elétrica que circula nos enrolamentos, (LI *et al.*, 2016; ZHANG *et al.*, 2018). Em partes externas, como o equipamento de refrigeração, onde houver, pode conter partes frouxas aumentando a vibração do transformador. A vibração é um problema que deve ser verificado constantemente em máquinas elétricas, portanto, conhecer como se dá o seu aparecimento e também aumento de temperatura no núcleo laminado em um transformador é muito importante. Do lado primário do transformador e com o secundário em curto-circuito, é possível identificar a principal causadora de vibração como sendo a força eletrodinâmica nos

<sup>2</sup> Durante o processo de magnetização, materiais ferromagnéticos podem variar sua dimensão ou forma.

<sup>3</sup> É a sobreposição da força elétrica e magnética causadas por campo elétrico e magnético, respectivamente, em uma partícula elétrica que se move pelo espaço.

enrolamento e na carga. Essa força magnética faz criar vibrações no núcleo do transformador. Sabendo que a força eletrodinâmica é uma interação entre os enrolamentos do transformador e é proporcional ao quadrado da corrente de enrolamento, têm-se a Equação 1:

$$F \propto Bi^2, \quad (1)$$

em que  $B$  é o densidade de campo magnético e assumindo que a corrente no enrolamento do transformador durante o seu funcionamento constante é dada pela Equação 2:

$$i = I_m \cos \omega t, \quad (2)$$

sabendo que  $\cos^2 \omega t = 1/2(1 + \cos 2\omega t)$  e substituindo a Equação 2 na Equação 1, a força eletrodinâmica pode ser escrita pela Equação 3:

$$F = BI_m^2 \left( \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cos 2\omega t \right). \quad (3)$$

Portanto, a frequência da força magnética que provoca vibrações mecânicas é duas vezes a componente da frequência fundamental elétrica, em 60 Hz ou simplesmente o dobro de qualquer frequência. Assim, quando o transformador é alimentado por uma fonte com frequência de 60 Hz, as vibrações mecânicas tem uma componente de frequência fundamental de 120 Hz.

Desse modo, assume-se que a tensão elétrica é senoidal e o campo magnético é linearmente proporcional a intensidade de indução magnética,  $B = \mu H$  com a permeabilidade magnética linear (SHENGCHANG *et al.*, 2001; LI *et al.*, 2016). A Equação 4 descreve uma das forças dinâmicas que influenciam na vibração do transformador, é a aceleração no núcleo e é dada por:

$$a_n = -\frac{2\varepsilon_s U_1^2}{N_1 S B_s^2} \cos(2\omega t), \quad (4)$$

em que  $\varepsilon_s$  é a taxa de saturação de magnetostrição das chapas de ferro justapostas,  $S$  é a área da seção transversal do núcleo ( $\text{m}^2$ ),  $B_s$  é a densidade de campo magnético de saturação dada em (T),  $\omega$  é a frequência angular da tensão elétrica em (rad/s),  $N_1$  é o número de espiras do primário e  $U_1$  é a tensão elétrica do primário, dada em (V). A Equação 4 mostra que a

frequência fundamental de vibração mecânica é duas vezes a frequência elétrica de alimentação do transformador ( $2\omega$ ), e a aceleração no núcleo  $a_n$  é proporcional ao quadrado da tensão elétrica. Componentes harmônicas de vibração mecânica são causadas por fatores não-lineares e perdas no ferro.

As vibração originada nos enrolamentos do transformador são ocasionadas pelas forças eletrodinâmicas que foram causadas pela corrente elétrica e pelo fluxo disperso. Essas forças são proporcionais ao quadrado da corrente elétrica e são direcionadas vertical e radialmente aos enrolamentos. É assumido que a corrente é senoidal, e a Equação 5 descreve o comportamento da aceleração axial nos enrolamentos:

$$a_e = -pI^2 \sin(2\omega t + \beta). \quad (5)$$

Essa equação representa a vibração axial do estado estacionário do enrolamento, em que o sinal negativo mostra o sentido da força axial, e  $I$  é a corrente elétrica que circula pelo enrolamento, dada em (A). A aceleração nos enrolamentos  $a_e$  é proporcional ao quadrado da corrente e a frequência fundamental é duas vezes a tensão de alimentação. Os termos  $\beta$  e  $p$ , são a defasagem da corrente elétrica e condição inicial de vibração do enrolamento, respectivamente, relatado por Li *et al.* (2016).

Sabe-se que as vibrações no transformador são então originadas pelas forças magnetostriativas no núcleo e pelas forças eletromagnéticas nos enrolamentos. Elas são espacialmente distribuídas através de toda a estrutura, diferentemente das simulações que tem forças pontuais atribuídas nos testes modais convencionais. É necessário entender essa diferença ao usar a FRF para identificar a vibração do transformador e seus consequentes danos à estrutura.

## 2.2 PRINCIPAIS FALHAS EM TRANSFORMADORES

Falhas em transformadores podem ocorrer pelo resultado de diferentes causas e condições. As falhas em transformadores podem ser classificadas em elétricas, mecânicas ou térmicas. A causa de uma falha pode ser interna ou externa e geralmente podem ser definidas conforme segue na Tabela 3, de acordo com Wang *et al.* (2002). O padrão de falha dos transformadores segue uma curva chamada de banheira, conforme mostrada na Figura 2. A primeira parte da curva é a falha por mortalidade inicial de problemas de projeto ou instalação. A segunda parte da



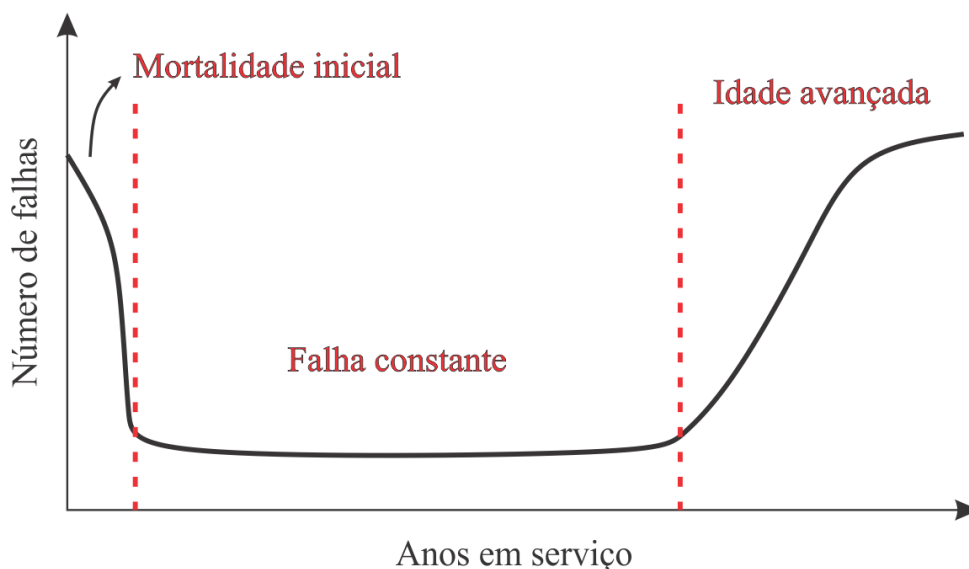
curva é a taxa de falha constante e a última parte da curva é a falha devido à idade avançada, que compreendem diversos tipos de falhas listados na Tabela 3. Além do envelhecimento normal, um transformador pode desenvolver uma falha que resulta em um envelhecimento mais rápido do que o normal, resultando em uma maior probabilidade de falha.

**Tabela 3 – Causas típicas de falhas em transformadores**

<b>Falhas Internas</b>	Deterioração da isolação; Perda de aperto no enrolamento; Superaquecimento; Concentração de gases; Umidade; Contaminação sólida no óleo isolante; Descargas parciais; Defeitos de projeto e fabricação; Ressonância nos enrolamentos.
<b>Falhas Externas</b>	Queda de raios; Operações de chaveamento do sistema; Sobrecarga do sistema; Falhas do sistema (curto-circuito).

Fonte: Adaptada de Wang *et al.* (2002)

**Figura 2 – Típico padrão de falhas em transformadores. Curva em formato de banheira.**



Fonte: Adaptada de Sparling (1999)

Os transformadores de potência provaram ser confiáveis em operação normal, com uma taxa de falha global de 1 a 2 % ao ano, (SPARLING, 1999). O fim da vida útil de um transformador é normalmente definido como a perda de resistência mecânica do isolamento

sólido dos enrolamentos. Esses transformadores de potência estão no último estágio da curva banheira. Espera-se que eles tenham uma taxa de falha crescente nos próximos anos, segundo Grechko e Kalacheva (1996).

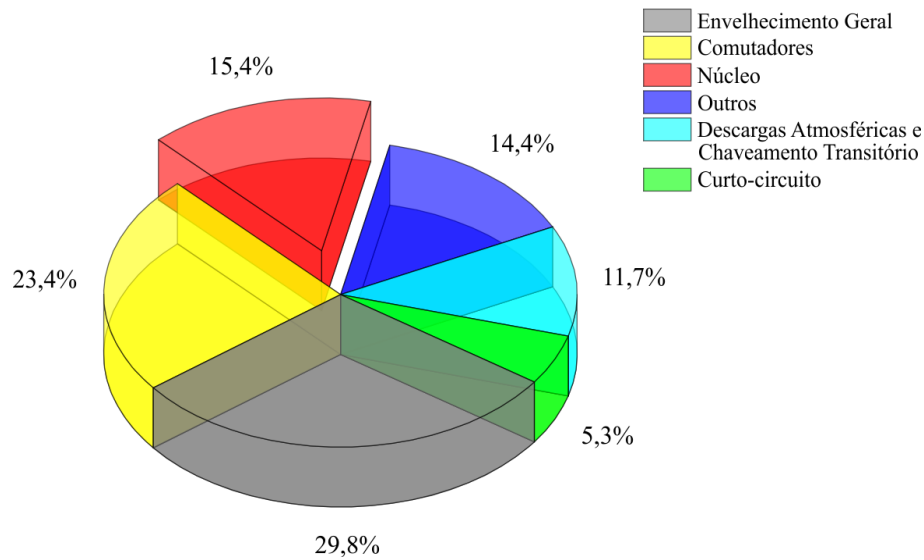
Grechko e Kalacheva (1996) relatam que as principais falhas em transformadores ocorrem nos cinco primeiros anos de funcionamento, e são devido a problemas como:

- umidade, contaminação e envelhecimento que causam a diminuição da rigidez dielétrica interna do transformador;
- danos ao enrolamento ou descompressão do enrolamento sob forças de curto-circuito;
- danos às buchas do transformador causados pela perda da rigidez dielétrica do isolamento interno.

O trabalho que apresenta dados de falhas em transformadores da África do Sul mostram que 29,8 % dos problemas ocorre por envelhecimento dos componentes de uma maneira geral, 23,4 % problemas ocorrem com comutadores e 15,4 % são problemas relacionados ao núcleo do transformador, visto na Figura 3 de acordo com os autores (MINHAS *et al.*, 1999). Essa análise de falhas foi baseada em 188 transformadores de potência com faixa de tensão elétrica de 88 à 765 kV, com potência variando de 20 até 800 MVA. Os autores também destacam que entre 6 e 10 anos é quando ocorrem problemas originados pelo núcleo de transformadores de altas potências. Em transformadores menores que 20 MVA os problemas no núcleo são incrementados com o passar dos anos, sendo essas falhas, principalmente na isolação do núcleo. Para detecção desses problemas, os métodos mais conhecidos são sensores de vibração, sensores de detecção de ruído e de medição de temperatura (MINHAS *et al.*, 1999).

Normalmente o transformador está sujeito a forças mecânicas devido ao transporte, forças eletromagnéticas causadas por curto-circuitos no sistema elétrico e correntes de partida da máquina. A vibração e as forças térmicas geradas por diferentes taxas de expansão térmica em diferentes materiais causam a degradação do papel isolante a longo prazo. A eventual falha dielétrica pode ocorrer quando as forças mecânicas rompem o isolamento. As forças mecânicas compressivas no papel de celulose podem causar fluxo de material e reduzir a pressão de aperto. Assim, o envelhecimento do papel de isolamento determina a vida útil final do transformador, embora outros fatores possam contribuir para a falha anterior, segundo Wang *et al.* (2002). Compreender as características de vibração de transformadores de potência ou de distribuição é

**Figura 3 – Percentagem de cada tipo de falhas apresentadas em estudo num universo de 188 transformadores.**



Fonte: Adaptada de Minhas *et al.* (1999)

necessário para a detecção de falhas elétricas e mecânicas usando estratégias de monitoramento da vibração como parâmetro principal, conforme (WANG; PAN, 2015).

Outra causa importante para monitoramento é o envelhecimento térmico dos materiais isolantes do transformador e essa causa está associada principalmente às reações químicas que ocorrem nos materiais. Essas reações são causadas pela oxidação, hidrólise<sup>4</sup> e pirólise<sup>5</sup>, e são aceleradas pelo aumento dos níveis de temperatura e da quantidade de oxigênio e umidade, que aceleram a oxidação dos componentes. Associado a reações químicas do papel isolante e vibrações mecânicas, ocorre a redução nas propriedades mecânicas desse isolante. Então, o isolamento do papel torna-se frágil a ponto de quase se desfazer, no limite de manter a rigidez dielétrica, (BASAK, 1999; AGOU *et al.*, 2000; WANG *et al.*, 2002; ARVIND *et al.*, 2008).

A temperatura de um transformador tem um grande impacto na vida útil do isolamento. O monitoramento contínuo da temperatura do óleo do transformador, juntamente com um modelo térmico do transformador, pode fornecer uma estimativa da perda de vida útil do transformador devido ao superaquecimento. Ensaios são necessários para controle da elevação de temperatura, elevação de temperatura no topo do óleo, elevação de temperatura média do óleo, elevação de temperatura no enrolamentos, são alguns ensaios descritos por (NBR5380, 1993; SCHWABE *et al.*, 2000; VICENTE *et al.*, 2008).

<sup>4</sup> Hidrólise é qualquer reação química na qual uma molécula de água quebra uma ou mais ligações químicas.

<sup>5</sup> Pirólise é uma reação de análise ou decomposição que ocorre pela ação de altas temperaturas. Ocorre uma ruptura da estrutura molecular original de um determinado composto pela ação do calor em um ambiente com pouco ou nenhum oxigênio.

Geralmente, quando usa-se o termo monitoramento entende-se por parâmetros básicos e quando se fala em diagnóstico leva-se a pensar em uma análise sofisticada, realizada por sistemas especialistas capazes de fornecer uma avaliação das condições do equipamento e sugerir ações para evitar falhas futuras ou preveni-las. Existem vários métodos tradicionais de diagnóstico de problemas em um transformador. Testar o óleo isolante de enrolamentos é um dos mais comuns testes aplicados para avaliar as condições de serviço de um transformador. Testes de degradação do papel ou óleo são muito comuns para as análises da condição do transformador, pois impactam diretamente na degradação da isolação, provocando problema maiores como curto-circuitos. A análise da dissolução de gases também é aplicada para identificar funcionamentos elétricos e térmicos anormais, justamente pelas concentrações de oxigênio e outros gases que se formam por descargas parciais, sobreaquecimento, arco voltaico, entre outras causas (DUVAL, 1989; SUN *et al.*, 2012).

Outra forma de monitoramento do transformador envolve o fator de potência de isolamento que é a razão entre a componente de corrente resistiva e a corrente de fuga total sob uma tensão aplicada. A medição do fator de potência é uma fonte importante de dados no monitoramento das condições do transformador e das buchas, de acordo com Belanger (1999). A resistência do enrolamento também é usada para indicação de falhas, em que verifica-se o condutor do enrolamento e a condição de contato do comutador. A resistência do enrolamento varia com a temperatura do óleo. Durante o teste, a temperatura deve ser registrada. Para futuras comparações, a resistência deve ser convertida para uma temperatura de referência (BELANGER, 1999).

O teste da relação de espiras do enrolamento é útil para determinar se há ou não espiras em curto ou circuitos de enrolamento em aberto. A relação medida deve estar dentro de 0,5 por cento da relação das tensões nominais entre os enrolamentos, conforme observado na placa de identificação do transformador. Todas as posições dos tapes e todas as fases devem ser medidas. O teste pode ser executado em uma tensão muito baixa (KANNAN; RAO, 1975; WHITE, 1981).

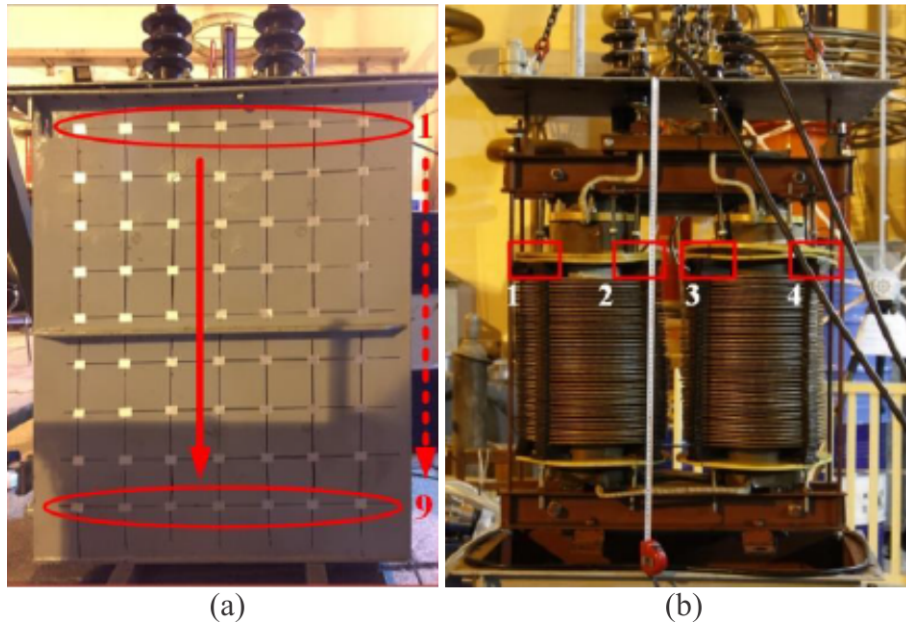
Testes de descarga parcial (DP) em serviço também são realizados em transformadores, pois é por meio desses testes que verifica-se a degradação das propriedades dos materiais isolantes e que podem levar a eventuais falhas, (BENGTSSON, 1996). Existem dois métodos de detecção de DP comumente usados: detecção dos sinais acústicos e medição dos sinais elétricos produzidos pela DP. A DP também pode ser detectada indiretamente, usando técnicas químicas, como medir os produtos de degradação produzidos pela DP. Os limites aceitáveis de DP para

novos transformadores dependem da tensão e do tamanho dos transformadores. Os pulsos de DP geram ondas de estresse mecânico que se propagam através do óleo circundante em uma faixa de 100 a 300 kHz (FESER *et al.*, 2000). Para detectar essas ondas, os sensores de emissão acústica são montados na parede do tanque do transformador ou no óleo dentro do tanque do transformador no óleo.

O método de medição da tensão de recuperação, conforme (URBANI; BROOKS, 1998; TALIB *et al.*, 2003; KAGAWA *et al.*, 2012) é usado para detectar as condições do isolamento de papel oleoso e o conteúdo de água do isolamento. O método se baseia no princípio da polarização interfacial de materiais dielétricos compostos, isto é, o acúmulo de cargas espaciais nas interfaces do isolamento de papel e óleo devido a impurezas e umidade. Uma tensão CC é aplicada ao isolamento por um tempo. Os eletrodos são então curto-circuitados por um curto período de tempo, após esse período, o curto-circuito é removido para examinar a taxa de aumento de tensão ou o perfil de polarização. A constante de tempo associada a esse pico de tensão de recuperação fornece uma indicação do estado do isolamento. Os principais parâmetros derivados do espectro de polarização são o valor máximo da tensão de recuperação, o tempo para o valor de pico e a taxa inicial de aumento da tensão de recuperação. Os resultados do teste dão uma indicação do estado do estrutura de isolamento de óleo/papel do transformador.

Um problema muito sério e particularmente difícil de detectar é o movimento ou distorção do enrolamento do transformador. Forças no enrolamento durante curtos-circuitos no transformador podem causar distorção no próprio enrolamento. A outra fonte de movimento do enrolamento é a redução ou perda de fixação do enrolamento. Isso pode resultar em uma falha do transformador que causará danos e pode resultar em falha explosiva do transformador. Tradicionalmente, a única maneira de avaliar a condição do enrolamento de um grande transformador de potência é drenar o óleo do transformador e realizar uma inspeção interna. Alguns trabalhos de pesquisa têm se concentrado no uso do sinal de vibração do transformador para detectar a folga do enrolamento e também problemas no núcleo e no desenvolvimento de técnicas de análise para interpretar os dados de vibração (MECHEFSKE, 1995; SHI *et al.*, 2018). O sistema de medição criado por Shi *et al.* (2018) é uma matriz de acelerômetros piezoelétricos, distribuídos em uma rede de  $10 \times 10$  cm, visto na Figura 4(a). A medição se dá do topo para a base em linhas, a cada tempo e mede vibração do núcleo e principalmente por falta de aperto ou afrouxamento dos enrolamentos. A Figura 4(b) apresenta os pontos de falha, quando os enrolamentos perderam o aperto.

**Figura 4 – (a) Superfície externa de um transformador com pontos de medição usando sensores acelerômetros piezoelétricos. (b) Localização das falhas nos enrolamentos.**



Fonte: Adaptada de Shi *et al.* (2018)

Entre tantos testes apresentados e válidos para atingir-se um diagnóstico completo de um transformador, Minhas *et al.* (1999) comenta que aproximadamente 15,4 % dos problemas ocorre no núcleo do transformador. Entretanto não é trivial medições diretamente no núcleo de ferro na parte interna do transformador, pois para os sensores convencionais o posicionamento de cada sensores é externo ao equipamento, na carcaça. Normalmente o tipo dos sensores convencionais são acelerômetros ou *strain gages* para a medição de vibração. Pondera-se que para criar uma matriz de sensores elétricos ou piezoelétricos, Figura 4, há necessidade de muitos cabos elétricos, e com problemas de interferência na leitura dos sensores, visto que um transformador é um local de grandes campos magnéticos. Em contra-partida, sensores ópticos não sofrem interferência eletromagnética e podem ser multiplexados em uma única fibra óptica, (MA *et al.*, 2018). Lu *et al.* (2018) relatam que a técnica de monitoramento e diagnóstico da condição do transformador com base em vibração do núcleo ocupa uma grande proporção na vibração total do transformador. Além do efeito da magnetostricção já abordado na seção 2.1 causador de vibração no núcleo, a temperatura do núcleo também é considerado um fator de influência nas características de vibração do núcleo, de acordo com (LU *et al.*, 2018). Entretanto, usaram sensores de vibração piezoelétricos em condições de tensão de excitação nominal, localizados em diversos pontos da superfície do núcleo do transformador à seco. Extraíram o espectro de frequências para monitorar a vibração e as condições mecânicas gerais da máquina. Identificaram que na temperatura de

70 °C e abaixo, a resposta em frequência é linear, e com o aumento da temperatura surgem vibrações em taxas de 0,11 até 0,37 mm.s<sup>-2</sup>/°C.

A análise da resposta em frequência (FRA) será abordada na seção 2.3. Essa análise convencional requer interrupção do transformador para realização de testes, usando as tensões transitórias geradas durante operações de comutação. Wang *et al.* (2002) relatam na necessidade de realização de teste com a máquina em operação, reduzindo interrupções pelos testes. Muito embora é umas das análises mais eficazes na predição e detecção de movimento dos enrolamentos.

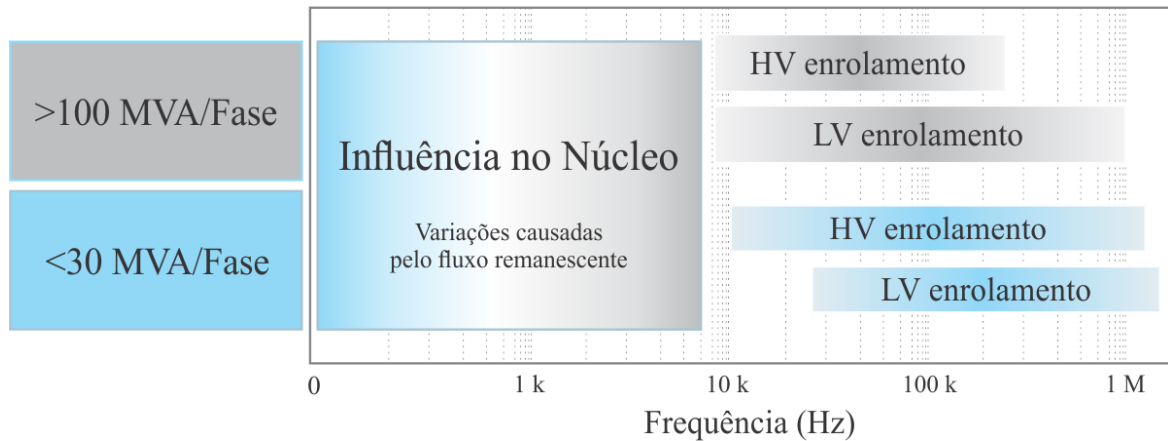
### 2.3 ANÁLISE DA RESPOSTA EM FREQUÊNCIA DE VIBRAÇÃO DE TRANSFORMADORES

O posicionamento dos sensores no transformador, o encapsulamento dos sensores ópticos e a sensibilidade das FBGs são importantes para o projeto em si, entretanto, a identificação da assinatura em frequência padrão do transformador também é necessária. Por meio da análise da resposta em frequência do transformador que se baseia a comparação dos dados experimentais e simulados, auxiliando na detecção de falhas elétricas e mecânicas.

O monitoramento da integridade estrutural do termo em inglês *Structural Health Monitoring* (SHM) em testes não destrutivos é válida e importante, pois é partir desse tipo de monitoramento que surgem novas técnicas e projetos de dispositivos para diagnósticos de falhas em equipamentos e estruturas. Em tratando-se de transformadores, umas das fontes de vibração é o núcleo, então monitoramento diretamente na origem beneficia o seu monitoramento, visto que não há perda de sinal. Além disso, os sensores comerciais são posicionados de maneira externa ao equipamento, dificultando a identificação da origem dessa vibração (núcleo ou enrolamentos), conforme destaca o Conselho Internacional de Grandes Sistemas Elétricos (CIGRE). O Conselho apresenta em suas notas técnicas faixas de frequência que cada componente interfere na resposta em frequência de um transformador (CIGRE, 2008), visto na Figura 5.

Pela Figura 5 percebe-se que a influência da faixa de frequência de 0 até 6 kHz no núcleo é causada pelo fluxo remanescente e para qualquer potência de transformador. Para transformadores com potência acima de 100 MVA, os enrolamentos de alta e baixa tensão (HV e LV) sofrem influências a partir de 7 kHz até 250 kHz para HV e de 7 kHz até 1 MHz para os enrolamentos LV. Em transformadores de menores potências, abaixo de 30 MVA, para enrolamentos de HV de 10 kHz até 1,5 MHz e para os enrolamentos de LV a faixa de frequência que influencia o equipamento vai de 25 kHz à aproximadamente 2 MHz. Embora

**Figura 5 – Faixa de frequência e suas respectivas influências do núcleo e enrolamentos de alta ou baixa tensão na FRF do transformador.**



Fonte: Adaptada de CIGRE (2008)

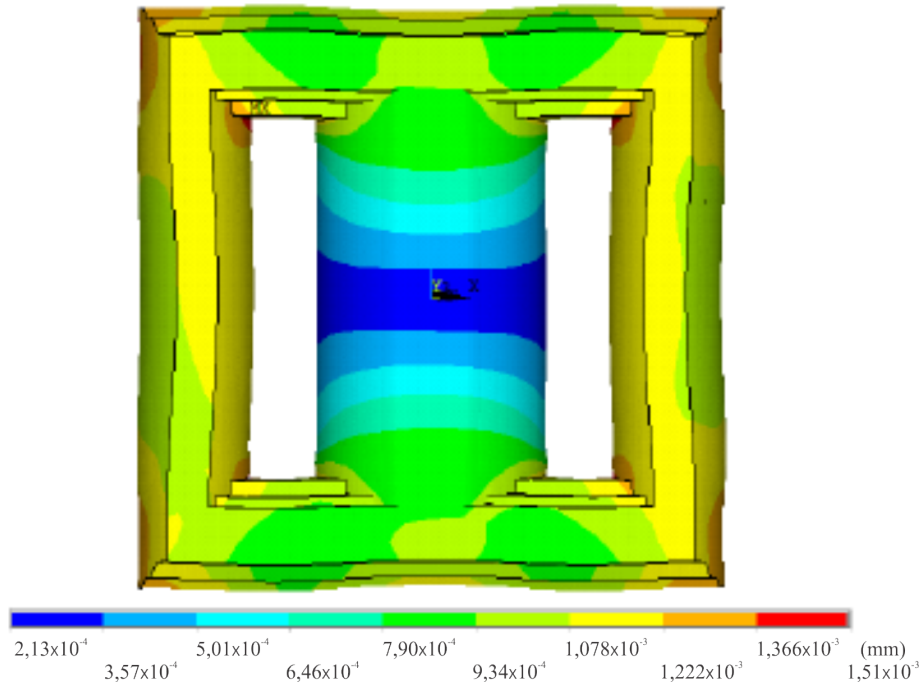
a Figura 5 não mencione os transformadores que compreendem a faixa X de potência de  $30 \text{ MVA} \leq X \leq 100 \text{ MVA}$ , pois foi um estudo de caso específico, fica claro que essa faixa também sofre influências no núcleo e enrolamentos. Então, uma ferramenta útil para nortear análises, diagnósticos preliminares ou conclusivos é a Análise da Resposta em Frequência (FRA). Identificar cada FRF dos equipamentos é a chave para antever e identificar problemas elétricos e/ou estruturais, (MITCHELL; WELSH, 2011). Pode-se determinar alguns tipos de parâmetros utilizando a FRF, como relatam (ABEYWICKRAMA *et al.*, 2008), que usaram um método analítico de análise de resposta em frequência para determinar a influência das condições de magnetização do núcleo de transformadores de distribuição.

A Figura 6 apresenta uma simulação em elementos finitos que mostra as vibrações mecânicas do núcleo de um transformador de potência de 270 MVA. O pico máximo de deslocamento de vibração do núcleo do transformador foi de  $1,51 \mu\text{m}$  nas extremidades do núcleo (ZHANG *et al.*, 2018).

Contin *et al.* (2011) propôs um algoritmo baseado em lógica *fuzzy* para realizar análises automáticas de FRF em transformadores de potência. Para tal, quantificou a diferença entre uma resposta em frequência de referência e funcionamento com falhas. A faixa de frequência investigada foi de 2 Hz a 1 MHz, e foi capaz de diagnosticar um curto-circuito em falhas de isolamento do enrolamento e também deslocamentos axial e radial do mesmo enrolamento. A Figura 7(a) apresenta um dos resultados obtidos, uma curva de referência, uma curva do resultado experimental com uma falha de curto-circuito em 300 kHz e como resultado da falha, deformaram os enrolamentos do equipamento (CONTIN *et al.*, 2011) visto na Figura 7(b). Conforme apresentado na Figura 5, a falha ocorreu em um dos enrolamentos de um transformador



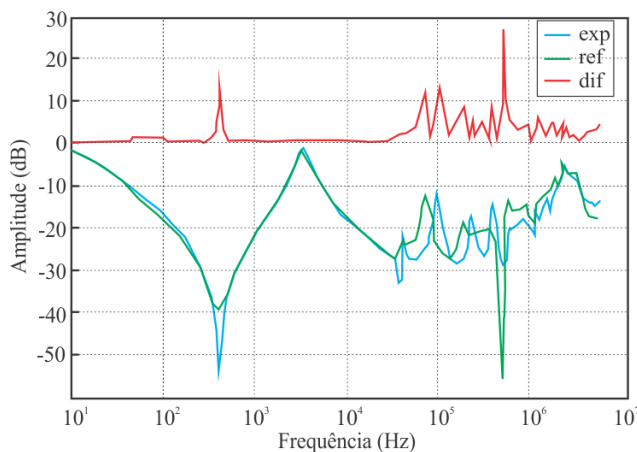
**Figura 6 – Distribuição de vibração mecânica em milímetros no núcleo de um transformador por meio de simulação de elementos finitos.**



Fonte: Adaptada de Zhang *et al.* (2018)

de 60 MVA, visto pelo pico de frequência na curva experimental em 300 kHz. O monitoramento prévio desse transformador poderia ter evitado a falha de curto-circuito pela degradação da isolamento. A FRF apontaria vibrações indesejadas na região apontada pela falha.

**Figura 7 – (a) Comparação da varredura em resposta em frequência em um das fases de um transformador de 60 MVA, 400 kV, antes e depois de uma falha catastrófica de curto-circuito. (b) Foto da falha ocorrida e que danificou completamente o transformador**



(a)



(b)

Fonte: Adaptada de Contin *et al.* (2011)

Ghani *et al.* (2012) apresentam um diagnóstico de falhas em transformadores de potência usando a varredura de resposta em frequência (SFRA). Os autores destacam que realizando

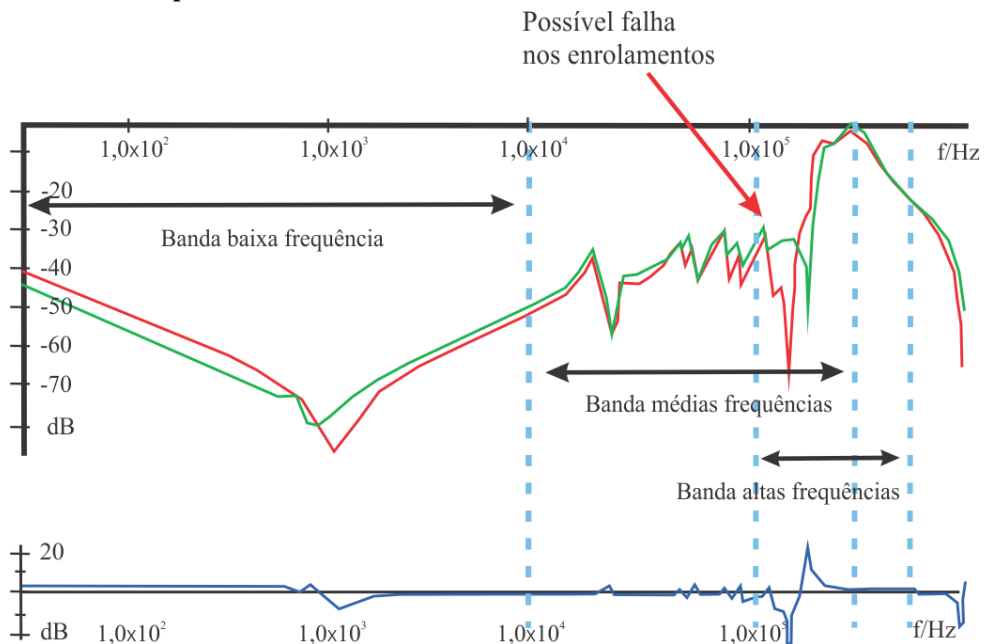
comparação entre duas respostas em frequência obtêm-se diferenças significativas em bandas distintas de frequências, onde cada região pode potencialmente indicar problemas mecânicos ou elétricos. Os autores mostram que cada faixa de frequências pode influenciar o aparecimento de falhas em partes dos transformadores (GHANI *et al.*, 2012). A Tabela 4 mostra três faixas de operação e possíveis fenômenos que ocorrem no funcionamento do transformador.

**Tabela 4 – Faixa de frequência usada na interpretação da SFRA**

Faixa de Frequência	Potenciais Elementos Defeituosos
Abaixo de 10 kHz	Nesta faixa, fenômenos ligados ao núcleo do transformador e circuitos magnéticos são encontrados
5 kHz até 500 kHz	Nesta faixa são detectados fenômenos ligados a movimentos geométricos relativos radiais entre enrolamentos
Acima de 400 kHz	Nesta faixa as deformações axiais em cada enrolamento são detectáveis

Fonte: Adaptada de Ghani *et al.* (2012)

**Figura 8 – Resultado da medição em SFRA comparando as curvas de frequência dos enrolamentos de alta tensão de um transformador trifásico, falha em alta frequência**

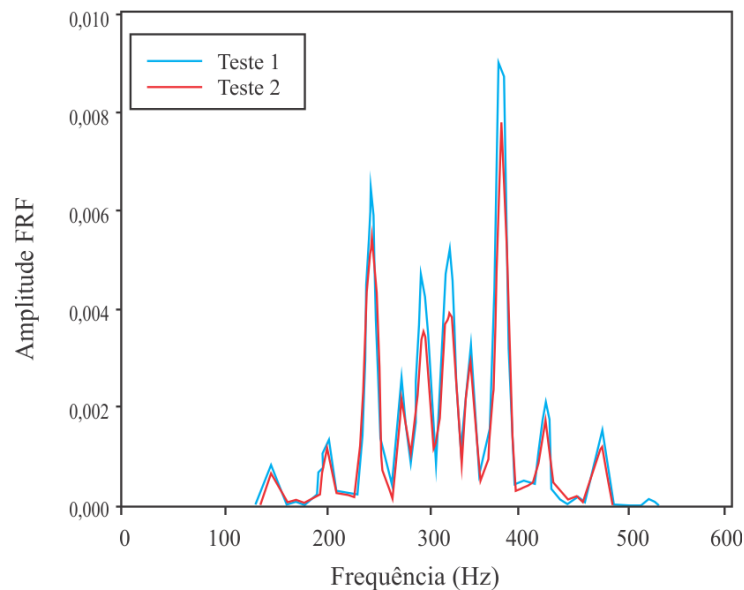


Fonte: Adaptada de Ghani *et al.* (2012)

Zhang *et al.* (2015) realizaram ensaios experimentais de curto-circuito com picos de corrente de até 6,6 kA. Os autores usaram sensores piezoelétricos para o monitoramento de vibração. Cada sensor foi posicionado na carcaça externa do transformador, similar a posição de cada enrolamento. O espectro de vibração em curto-circuito foi apresentado na faixa usual de

0 a 600 Hz. O autores demonstraram que há uma correlação entre curto-circuito e a resposta em frequência da máquina. Dessa forma é possível conhecer a correlação de um curto-circuito e os efeitos provocados pelas falhas elétricas. Então, percebe-se que há uma assinatura em frequência de cada máquina elétrica e também para cada falha. A Figura 9 mostra que há semelhança entre as curvas de resposta em frequência à vibração, quando o transformador foi submetido a repetidas falhas de curto-circuito (ZHANG *et al.*, 2015).

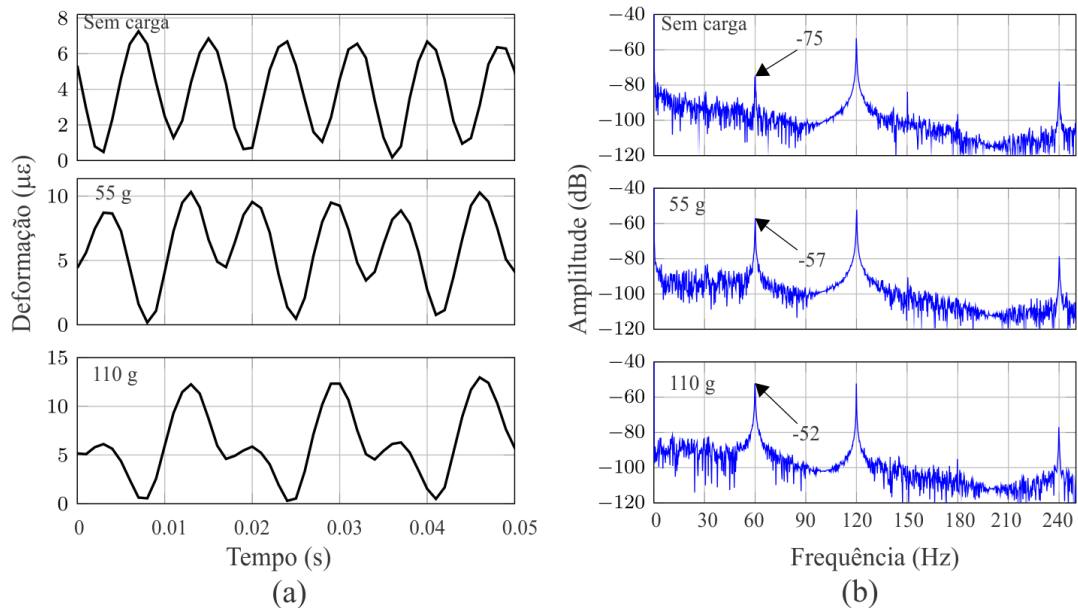
**Figura 9 – Resultado de testes de curto-circuito, evidencia a semelhança entre sinais correlatos de vibração nos enrolamentos**



**Fonte: Adaptada de Zhang *et al.* (2015)**

Embora em motores de indução, Sousa *et al.* (2016) analisaram a resposta em frequência de um sensor FBG para medição de deformação em motores de indução trifásicos de dois polos de 5 HP e quatro polos de 3 HP, conectados em triângulo e operando a 220 V. Induziram uma falha de excentricidade aos motores inserindo uma carga mecânica, criando assim um desbalanceamento no motor. Dessa forma, usaram sensores FBGs posicionados transversalmente ao comprimento longitudinal dos dentes do motor, medindo a vibração provocada pela falha. Com a variação da carga o comportamento do motor se altera, e o sensor FBG foi capaz de detectar essa variação. A Figura 10 mostra a variação de carga excêntrica ao eixo do motor de dois polos, variando no tempo e em frequência. Percebe-se um desbalanceamento a medida que se acrescenta carga ao eixo, componentes harmônicos se intensificam em 60 Hz, o que é prejudicial ao funcionamento normal do motor (SOUSA *et al.*, 2016).

**Figura 10 – Sinal de vibração no domínio do tempo e espectro de frequências para diferentes carregamentos ao eixo do motor**



Fonte: Adaptada de Sousa *et al.* (2016)

## 2.4 REDES DE BRAGG EM FIBRAS ÓPTICAS

Sensores ópticos do tipo de redes de Bragg são precisos, estáveis, e principalmente imunes a interferência eletromagnética, tornando-os desejáveis em aplicações de medições em equipamentos elétricos, de acordo com (MELTZ *et al.*, 1989; HILL; MELTZ, 1997; OTHONOS, 1997; LAU, 2014; OLIVEIRA *et al.*, 2008). Conforme os autores, os sensores ópticos podem ser facilmente configurados para atuarem encapsulados em estruturas de grande porte, ou até mesmo em compósitos, sendo facilmente moldados à geometria desejada.

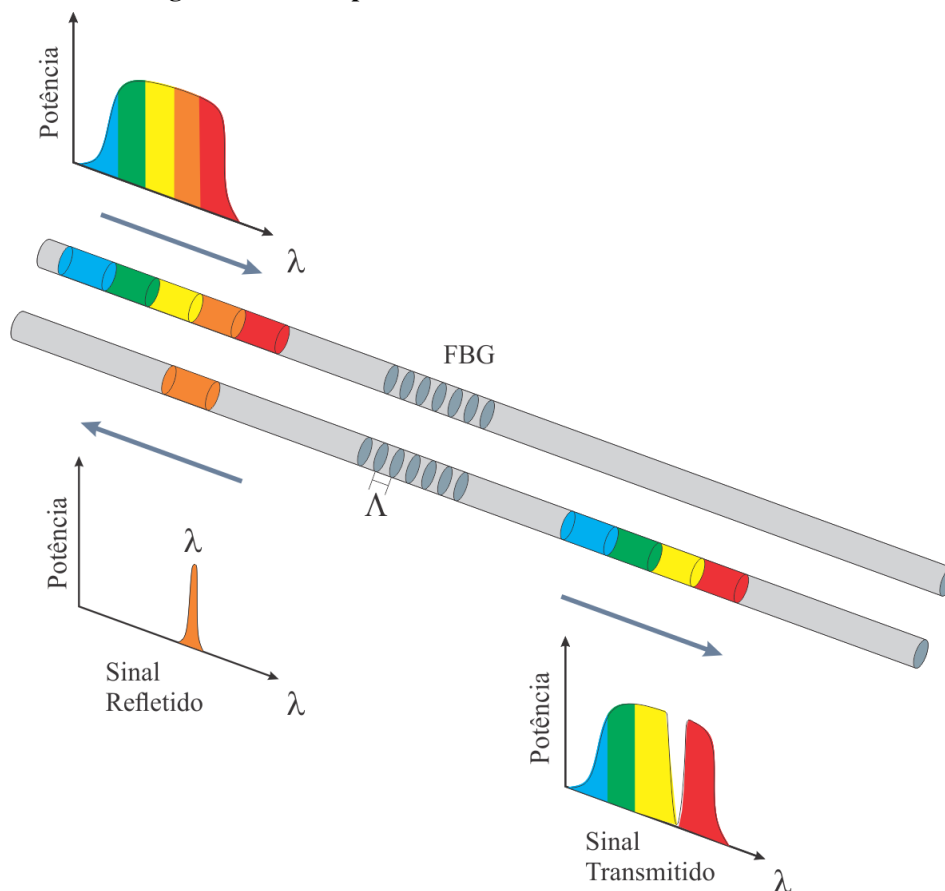
Todos os sensores usados neste trabalho são do tipo FBGs uniformes. Sobretudo, de uma maneira geral os sensores FBG são formados por uma modulação periódica do índice de refração do núcleo de uma fibra óptica. Essa modulação permite que uma parte estreita do espectro original da luz de banda larga seja refletida. Essa banda refletida está centrada próximo ao comprimento de onda de Bragg dado por  $\lambda_B$ . A variação de deformação mecânica e/ou a variação de temperatura causam variações nesse comprimento de onda de Bragg (HILL *et al.*, 1978). A resposta modulada em frequência reduz os problemas causados pela variação de intensidade da fonte óptica ou atenuação por curvaturas e que afeta os sensores que operam com intensidade e isso facilita a calibração do sensor FBG. Uma FBG iluminada por uma fonte óptica de banda larga reflete apenas uma parcela de banda centrada no comprimento de onda de Bragg, enquanto os comprimentos de onda fora dessa banda são transmitidos. A condição de Bragg é

dada pela Equação 6, onde  $\lambda_B$  é o comprimento de onda de Bragg,  $\Lambda$  é a modulação periódica do índice de refração, e  $n_{eff}$  é o índice de refração efetivo no núcleo da fibra.

$$\lambda_B = 2n_{eff}\Lambda. \quad (6)$$

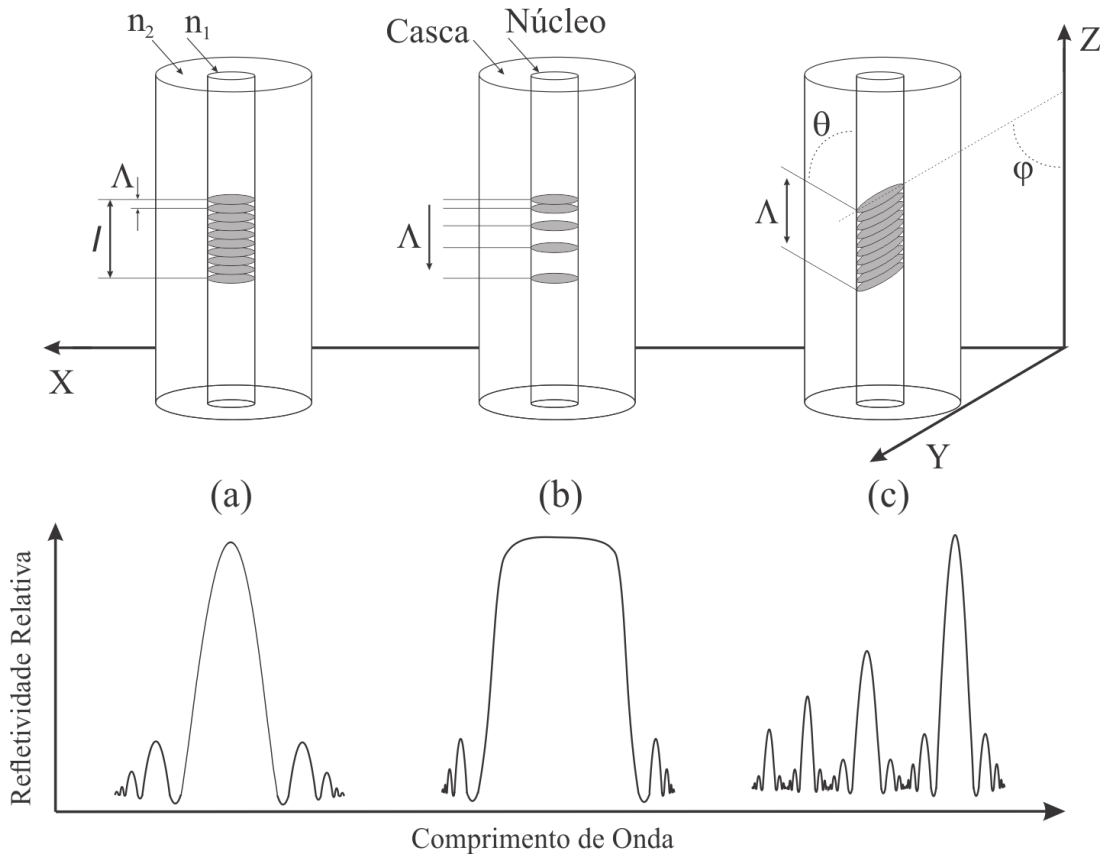
A representação do princípio de funcionamento de uma rede de Bragg em fibra óptica é apresentada na Figura 11. Uma fonte de luz de banda larga incide no núcleo da fibra óptica. Uma banda estreita é refletida pela FBG, e a outra parte é transmitida através da FBG. As FBGs normalmente usadas em sensores de deformação e temperatura são do tipo uniforme, onde o espaçamento da rede  $\Lambda$  é periódico, pode-se ver esse tipo no diagrama da Figura 12(a). Na Figura 12(b) é apresentado um tipo de rede aperiódica ou *chirped* onde a periodicidade da rede é variável, causando um espectro refletido significativamente largo e saturado e são frequentemente usados em filtro passa-banda conforme (WU *et al.*, 2010) ou ainda em interrogadores, de acordo com (CHTCHERBAKOV; SWART, 2004).

**Figura 11 – Princípio de funcionamento de um sensor FBG.**



**Fonte: Adaptada de Othonos (1997)**

**Figura 12 – Diferentes redes de Bragg, espectro refletido; (a) uniforme; (b) aperiódica ou *chirped*; (c) inclinada ou *tilted*.**



**Fonte: Adaptada de Allwood *et al.* (2017)**

Na Figura 12(c) vê-se que a rede é do tipo inclinada ou o termo mais comum em inglês *tilted*, a rede está com um ângulo  $\theta$  em relação ao eixo óptico ou núcleo da fibra óptica, além de um ângulo  $\varphi$  em relação ao eixo Z. Esse tipo de FBG faz com que a luz seja acoplada fora do núcleo da fibra e é geralmente usada em interrogadores ópticos como espectrômetros, descrevem (ZHAO *et al.*, 2010; SUO *et al.*, 2008). Essencialmente, todos os diferentes tipos de redes de Bragg produzem diferentes perfis de espectro refletido ou transmitido. Cada perfil pode ser manipulado e controlado de acordo com a aplicação desejada (ALLWOOD *et al.*, 2017).

#### 2.4.1 Rede de Bragg em Fibra Óptica como Elemento Sensor

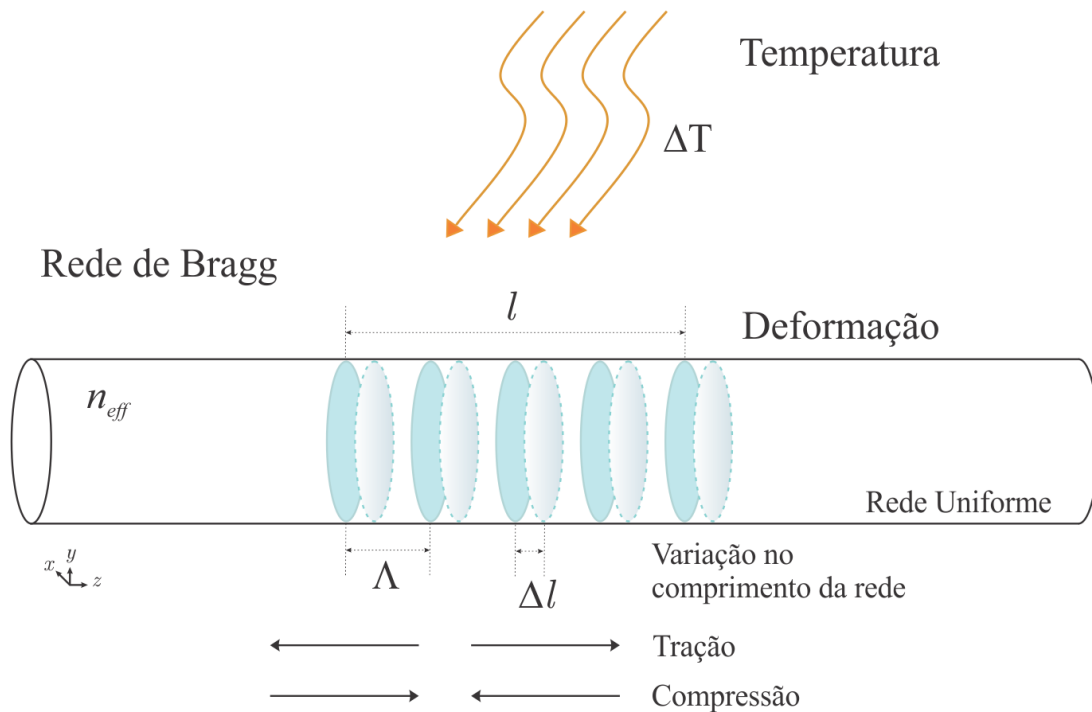
Perturbações externas, como deformações mecânicas longitudinais na fibra óptica ou variações na temperatura afetam o comprimento de onda de Bragg  $\Delta\lambda_B$ . Essa variação ocorre devido às mudanças na periodicidade da rede  $\Lambda$  ou no índice de refração efetivo  $n_{eff}$ . Esses efeitos sofridos pela rede de Bragg, provocam o deslocamento espectral do comprimento de onda

de Bragg, apresentado pela Equação 7 descrito por Kersey *et al.* (1997):

$$\Delta\lambda_B = 2 \left( \Lambda \frac{\partial n}{\partial l} + n \frac{\partial \Lambda}{\partial l} \right) \Delta l + 2 \left( \Lambda \frac{\partial n}{\partial T} + n \frac{\partial \Lambda}{\partial T} \right) \Delta T, \quad (7)$$

onde  $n$  é o índice de refração do núcleo da fibra,  $\Delta l$  é a deformação e  $\Delta T$  é a variação de temperatura. A variação no comprimento de onda de Bragg  $\Delta\lambda_B$ , descrito pela Equação 7, garante que o sensor FBG possa ser usado tanto para monitoramento de deformação quanto para temperatura, visto na Figura 13.

**Figura 13 – Rede Bragg sob influência de temperatura e deformação.**



Fonte: Adaptada de Othonos (1997)

O primeiro termo da Equação 7 é o efeito da deformação longitudinal ( $\varepsilon_z$ ) sobre a fibra óptica, correspondendo a uma variação da periodicidade da rede e uma mudança no índice de refração. O termo  $(\partial n/\partial l)$  representa as propriedades elasto-ópticas da fibra, enquanto que o termo  $(\partial n/\partial T)$  refere-se às propriedades termo-ópticas. Os termos  $(\partial \Lambda/\partial l)$  e  $(\partial \Lambda/\partial T)$  definem a deformação mecânica e térmica da FBG. A minimização da primeira parte da Equação 7 é uma função da deformação e da constante elasto-óptica ( $p_e$ ), representado pela Equação 8, de acordo com Othonos (1997).

$$\Delta\lambda = \lambda_B(1 + p_e)\varepsilon_z, \quad (8)$$

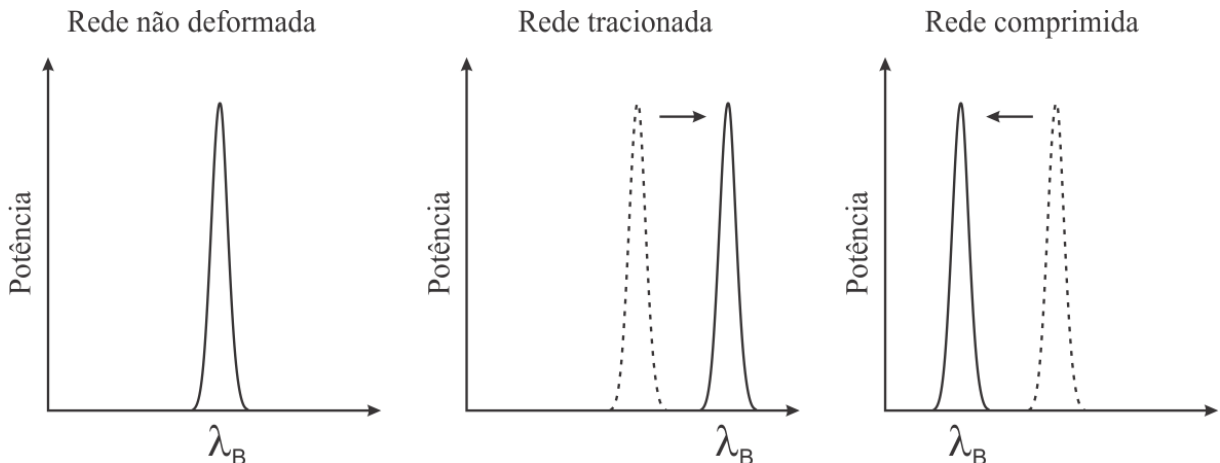
sendo que:

$$p_e = \frac{n_{eff}^2}{2} [p_{12} - \nu(p_{11} + p_{12})], \quad (9)$$

em que  $p_{11}$  e  $p_{12}$  são respectivamente, as componentes do tensor elasto-óptico e  $\nu$  a razão de Poisson. Para as fibras ópticas de germano-silicato,  $p_{11} = 0,113$ ,  $p_{12} = 0,252$ ,  $\nu = 0,16$  e  $n_{eff} = 1,482$ . Com esses dados é possível realizar o cálculo da sensibilidade de uma rede de Bragg, se  $\lambda_B = 1550$  nm, que apresenta deslocamento espectral de  $1,2$  pm/ $\mu\epsilon$ .

Na Figura 14 é possível verificar a rede de Bragg atuando como um sensor de deformação. Se a fibra óptica for tracionada, haverá um deslocamento do espectro em um sentido, e se houver uma compressão na fibra óptica, o deslocamento espectral será no sentido oposto. Esse efeito ocorre devido o aumento ou diminuição na periodicidade espacial ( $\Lambda$ ) da rede de Bragg.

**Figura 14 – Deslocamento espectral quando a rede de Bragg sofre influência de tração ou compressão.**



Fonte: Adaptada de Othonos (1997)

O segundo termo da Equação 7 constitui o efeito da temperatura sobre a fibra óptica. Na mesma situação de deformação por tracionamento ou compressão, ocorre variação no comprimento de onda de Bragg devido a temperatura, ocorrendo alterações no período espacial ( $\Lambda$ ) da rede ou no índice de refração ( $n_{eff}$ ). Da mesma maneira, fazendo a equação em função do coeficiente de expansão térmica da fibra ( $\alpha_\Lambda$ ) e do coeficiente termo-elástico do núcleo ( $\alpha_n$ ), tem-se a Equação 10.

$$\Delta\lambda = \lambda_B(\alpha_\Lambda + \alpha_n)\Delta T, \quad (10)$$



Normalmente os coeficientes de expansão térmica e termo-óptico, para as fibras ópticas de núcleo dopados de germânio, os valores típicos dessas constantes são  $\alpha_\Lambda = 0,55 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$  e  $\alpha_n = 8,6 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ . Assim sendo, é possível calcular a sensibilidade para uma FBG centrada em 1550 nm, com valor aproximado de 10 pm/°C. Observa-se que o coeficiente termo-óptico é uma ordem de grandeza superior ao coeficiente de expansão térmica, portanto, o efeito termo-óptico ( $\alpha_\Lambda$  - variação do índice de refração) é o principal responsável pelo deslocamento espacial do comprimento de onda de Bragg, de acordo com (MOREY *et al.*, 1990).

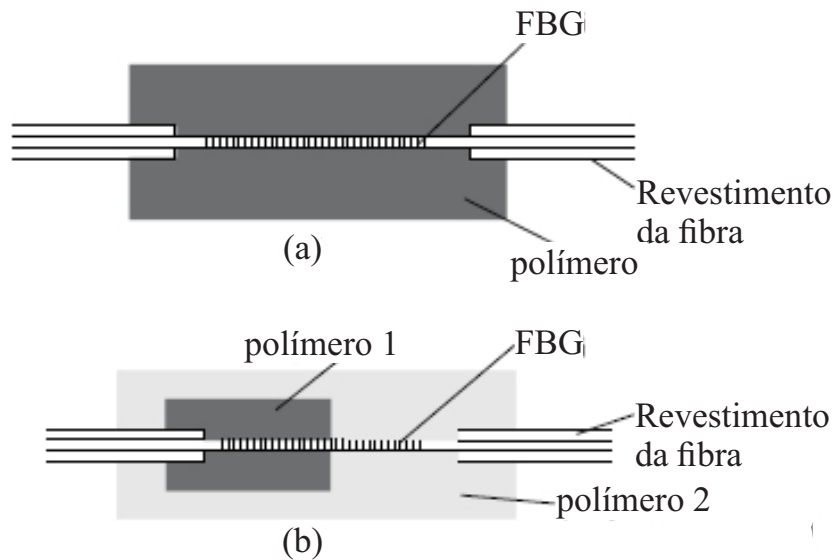
Ambos os termos são dependentes da variação da deformação longitudinal e temperatura e afetam a periodicidade da rede e o índice de refração do núcleo. Esse efeito que a deformação e a temperatura causam entre si é chamado de sensibilidade cruzada. Para resolver esse problema da sensibilidade cruzada, uma hipótese é usar um segundo sensor na mesma fibra óptica, tendo o comprimento de onda diferente, e por meio dele realiza-se a compensação da temperatura no sensor de deformação. O sensor de temperatura deve ficar totalmente isolado de qualquer força atuando sobre ele. Dessa forma, usa-se inserido em um tubo de vidro ou alumina. Para a compensação dos sinais, há a subtração do valor do sensor de temperatura pelo sensor de deformação, assim, garante-se a compensação do sinal de deformação. Esse assunto será melhor detalhado no Capítulo 3.

#### 2.4.2 Sensores FBGs encapsulados em Compósitos Aplicados a Máquinas Elétricas

O encapsulamento dos sensores ópticos é importante pois melhora a robustez do dispositivo, além da possibilidade de inserção de um outro sensor para medições de temperatura e também para a compensação da temperatura que influencia o sensor FBG de deformação. No emprego de sensores convencionais elétricos como os acelerômetros piezoelétricos ou *strain gages*, quando fixados na carcaça de transformadores, podem ocorrer alguns tipos de atenuação do sinal, e de certa forma encobrir a característica vibratória original do equipamento (BERLER *et al.*, 2000; RIKARDO *et al.*, 2008; ZHANG *et al.*, 2015; LI *et al.*, 2016). Um exemplo desta situação é visto em (SHENGCHANG *et al.*, 2001) onde o sistema de medição de vibração de um transformador consistia em posicionar um sensor piezoelétrico na carcaça externa do tanque de óleo refrigerante. Essa vibração gerada pelo núcleo e enrolamentos também viaja pelo óleo e chega até as partes mais externas do equipamento com possibilidade de atenuação do sinal das frequências de interesse. As características das bandas de frequências refletem diferentes propriedades elétricas do transformador, de acordo com Heindl *et al.* (2010).

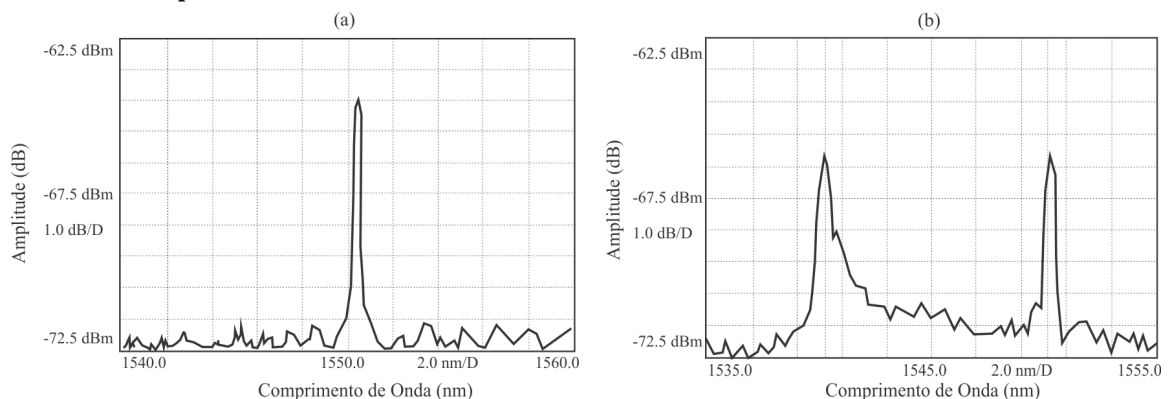
Liu *et al.* (2000) desenvolveram um dispositivo capaz de medir pressão e temperatura simultaneamente com apenas um sensor FBG. O dispositivo consiste em um revestimento de dois polímeros diferentes em diferentes seções do sensor FBG, com isso garantia duas sensibilidades diferentes e dois comprimentos de onda, apresentado na Figura 15. Na Figura 16 os espectros refletidos dos sensores FBGs com um polímero e com dois polímeros de revestimento (LIU *et al.*, 2000).

**Figura 15 – (a) Revestimento de um polímero sobre o sensor, e (b) dois polímeros diferentes revestindo o mesmo sensor**



Fonte: Adaptada de Liu *et al.* (2000)

**Figura 16 – (a) Espectro óptico para revestimento de um polímero e em (b) espectro para dois polímeros diferentes**



Fonte: Adaptada de Liu *et al.* (2000)

Outro estudo apresentando medição de pressão baseado na tecnologia de sensores FBG foi apresentada por (ZHANG *et al.*, 2001). O sensor apresentava um melhoramento na sensibilidade a pressão maior que  $-3,41 \times 10^{-3} \text{ MPa}^{-1}$ . Esse dispositivo é formado de um

revestimento polimérico sobre a FBG e um revestimento externo de alumínio que encapsulava o próprio polímero. Outro sensor desenvolvido, embora baseado na tecnologia Fabry-Perot, demonstra bem o aspecto de encapsulamento, onde os autores Kung *et al.* (2016) apresentam um filme fino de polímero de aproximadamente 2 mm que foi aplicado diretamente entre os enrolamentos de um transformador de 110 kV. A Figura 17 mostra o sensor e o posicionamento do mesmo entre os enrolamentos.

**Figura 17 – Sensor projetado em um filme fino de polímero e posicionamento em partes dos enrolamentos de um transformador de 110 kV**

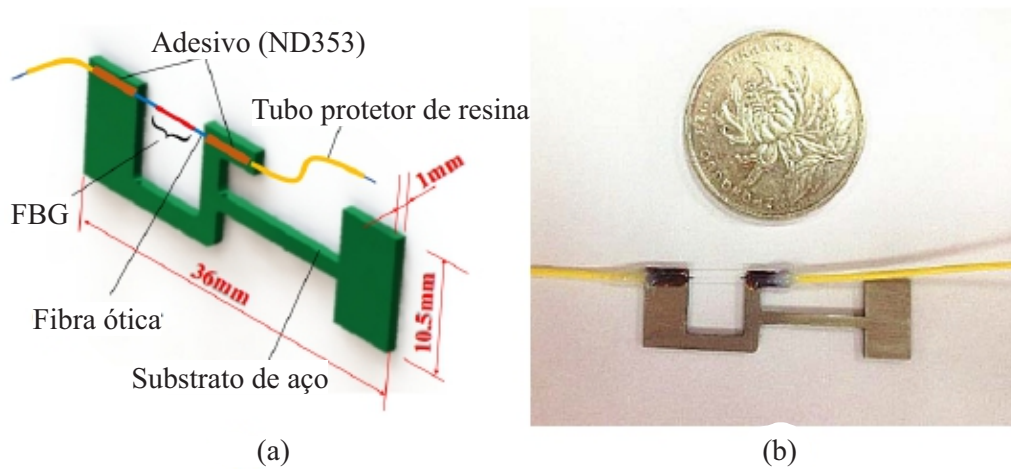


Fonte: Adaptada de Kung *et al.* (2016)

Há também os estudos que buscam um melhoramento na sensibilidade geral para sensores de deformação. O projeto de (LI *et al.*, 2018) obteve um sensibilidade de  $6,2 \text{ pm}/\mu\epsilon$ . Foi desenvolvido em um substrato de aço inoxidável e devido a sua geometria amplifica a sensibilidade a deformação. Esse dispositivo foi chamado de amplificador estrutural. Os autores realizaram simulações em elementos finitos para validação dos resultados. Além disso, o dispositivo tem pequena dimensão e pode ser facilmente adesivado a vários tipos de superfícies. Entretanto, a medição é realizada na estrutura de forma externa, e pelas características metálicas do material, tem restrições quanto ao uso interno em equipamentos elétricos, pois pode provocar curto-circuitos. A Figura 18 apresenta em escala real o amplificador estrutural de Li *et al.* (2018).

Melo *et al.* (2019) projetaram um sensor FBG de pressão e vibração para o monitoramento estático e dinâmico aplicado a enrolamentos de transformadores de alta tensão quando apresentam falhas do tipo curto-circuito ou quando estão em processo de partida da máquina, sabendo-se que correntes elevadas podem danificar o transformador. Os autores usaram dois tipos de encapsulamento polimérico para embarcar os sensores FBGs, um deles uma placa de isolamento elétrica de celulose, e o segundo um polímero termoplástico. Relatam os autores, que ambos tem boa características de isolamento elétrica, mecânicas, térmicas e químicas. O sensor

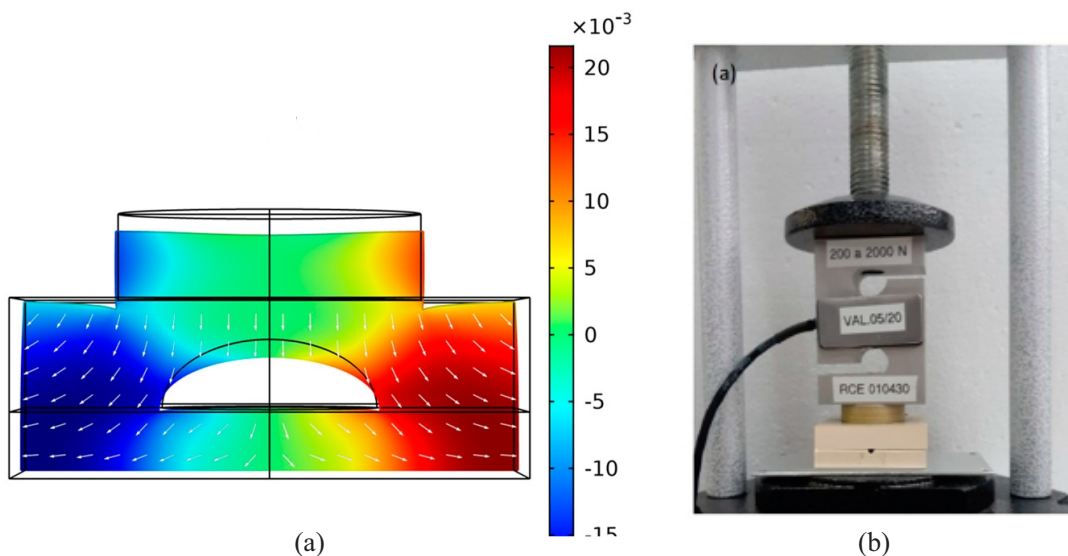
Figura 18 – (a) Projeto estrutural do sensor e (b) imagem real destacando a dimensão do dispositivo



Fonte: Adaptada de Li *et al.* (2018)

FBG fica posicionado na parte superior da estrutura do encapsulamento e esta, é deflexionada pelas forças originadas nos enrolamentos. O posicionamento se dá na parte superior e inferior dos três enrolamentos do transformador trifásico. A Figura 19(a) e (b) mostra uma simulação em FEM do modelo usado e um dos testes estáticos para calibração do sensores FBG, usando uma prensa hidráulica e sensores *strain gage* convencionais para comparação dos resultados (MELO *et al.*, 2019).

Figura 19 – (a) Simulação em elementos finitos, deformação da superfície gráfica. (b) Posicionamento do sensor em uma prensa hidráulica nos testes estáticos

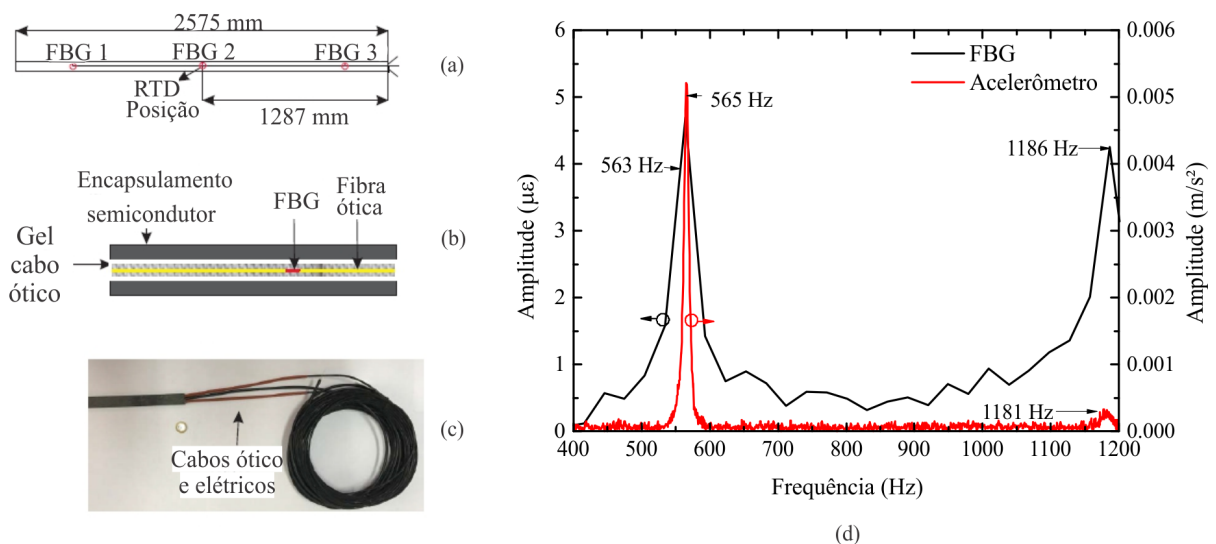


Fonte: Adaptada de Melo *et al.* (2019)

Na seção 2.4.3 é mostrado um estudo de Dreyer *et al.* (2017) que apresenta um sensor multiparamétrico de temperatura e deformação. Destaca-se a sua concepção encapsulado em

um tubo de tereftalato de polibutileno preenchido com gel, similar ao cabo óptico padrão de telecomunicações. A Figura 20 mostra as dimensões e o diagrama de encapsulamento dos sensores FBGs. Para calibração dos sensores de deformação usaram testes experimentais com martelo de impacto para determinação das frequências naturais por meio das resposta em frequência dos sistema. Pode-se perceber na Figura 20(d) que o estímulo ao sensor óptico foi semelhante a resposta mecânica do martelo de impacto, com uma variação de apenas -2 Hz, na primeira frequência natural em 565 Hz. Na segunda frequência natural, a resposta do sensor óptico se mostrou ainda mais sensível. O sensor piezoelétrico mecânico obteve  $0,0005 \text{ m/s}^2$ , enquanto que a FBG,  $0,004 \text{ m/s}^2$ , ou seja, oito vezes maior. A frequência teve variação de apenas 5 Hz para 1,181 kHz medido no martelo de impacto.

**Figura 20 – (a) Dimensões e posição dos sensores FBG. (b) Encapsulamento em gel e polímero. (c) Foto em tamanho real e (d) Curva de resposta em frequência, comparação resposta óptica FBG e mecânica martelo de impacto**



Fonte: Adaptada de Dreyer *et al.* (2017)

Os testes elétricos dos estudos de Dreyer *et al.* (2017) foram conduzidos em um hidrogenerador de 370 MVA, tensão de linha de 19,8 kV e corrente 11,2 kA. O posicionamento das barras de sensores foi entre as barras do estator do gerador. O sistema monitorou o funcionamento do gerador por um período de 23 horas e detectou uma falha com uma parada da máquina. Os autores mostram que houve uma diferença de aproximadamente  $1,3 \mu\epsilon$  na variação na deformação do estator, antes e depois da ocorrência da falha elétrica (DREYER *et al.*, 2017).

### 2.4.3 Monitoramento de Temperatura em Sistemas de Energia com Sensores Ópticos

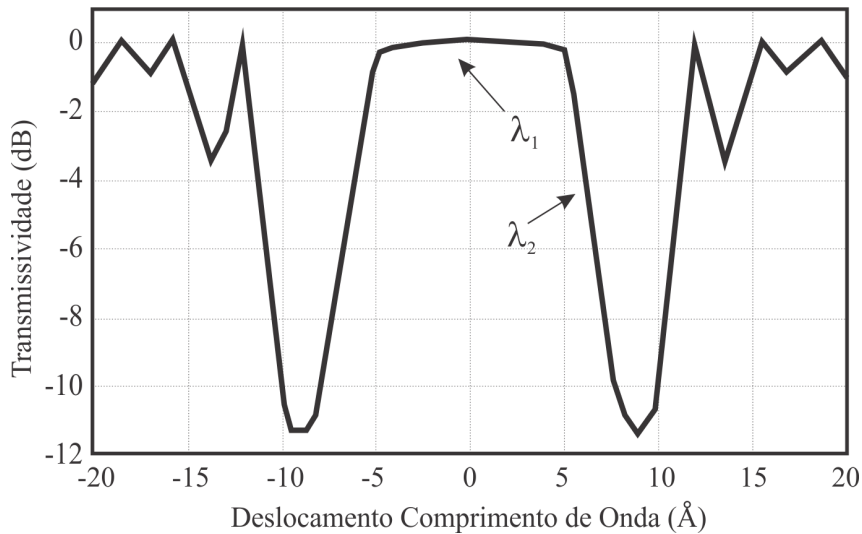
Morey *et al.* (1990) demonstraram a sensibilidade à temperatura de uma rede de Bragg. Também relataram que a rede testada manteve-se por 18 horas a 500 °C sem aparente degradação. Passados 30 anos, uma das principais aplicações para os sensores FBGs de temperatura é em sistemas de energia elétrica ou grandes sistemas de geração e transmissão, devido a sua imunidade a interferência eletromagnética e capacidade de multiplexação. Muitos autores destacam essa característica para a aplicação em sistemas de potência (ROMERO *et al.*, 1997; LEE *et al.*, 2006; KIM *et al.*, 2008; CHENG *et al.*, 2010; SOUSA *et al.*, 2011; DREYER *et al.*, 2017). Mas tão importante quanto a medição de temperatura, são as formas de compensação de temperatura usando FBGs para a detecção de outras grandezas físicas como, por exemplo, deformação. Em consequência disso, esse trabalho visa medir a deformação do núcleo de ferro de transformadores, utilizando a distinção entre as flutuações de temperatura e alterações oriundas das deformações do núcleo.

Romero *et al.* (1997) projetaram um dispositivo sensor de temperatura para aplicação em linhas de transmissão. Sua operação é realizada com um sinal óptico de dois comprimentos de onda  $\lambda_1$  e  $\lambda_2$  posicionados, o primeiro, no centro de uma filtro passa-banda, enquanto que o segundo é localizado na borda da banda do filtro. Dessa maneira, quando houver um aumento na temperatura, o espectro desloca para a direita, então a transmissividade no comprimento de onda  $\lambda_2$  altera drasticamente e o comprimento de onda  $\lambda_1$  permanece constante. A Figura 21 apresenta o gráfico do comportamento desse sensor de (ROMERO *et al.*, 1997). Em seus estudos, os autores informam um coeficiente de 15 pm/°C.

Para Lee *et al.* (2006) o monitoramento confiável e distribuído de temperatura é muito importante em sistemas de potência, porque quando ocorrem falhas, os resultados são enormes perdas socioeconômicas, tanto consumidores, como setor industrial. Para tal monitoramento, os autores construíram um sistema matricial de sensores para usá-los em cabos de potência. Para a implementação confiável, a matriz de sensores FBGs foi embarcada em tubo de metal para proteger os sensores de distúrbios externos, além da facilidade de soldá-los aos cabos elétricos. A faixa monitorada foi de 25 a 70 °C. A Figura 22(a) mostra o sinal de um fotodiodo que evidencia o sensor quasi-distribuído usado por (LEE *et al.*, 2006).

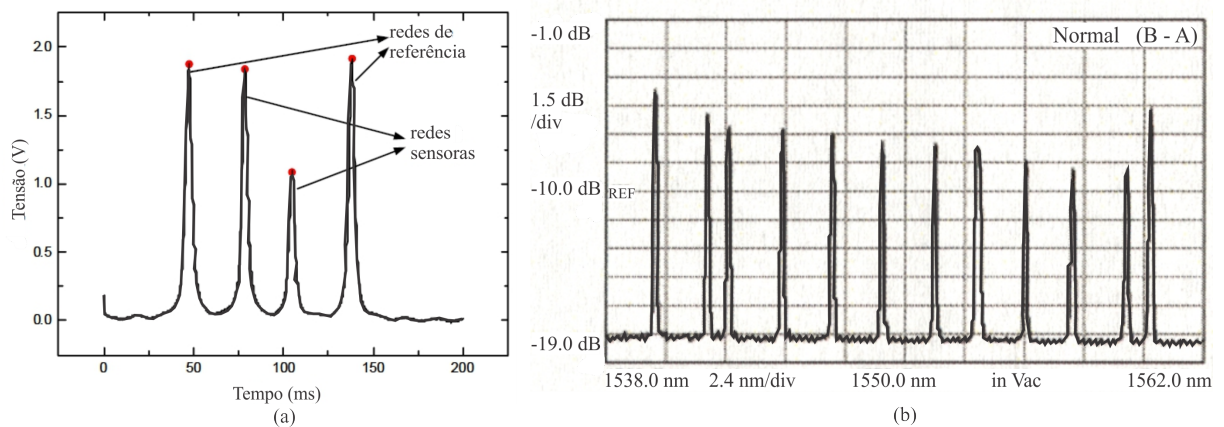
A Figura 22(b) apresenta o espectro do sinal de temperatura interna de um transformador, os sensores são multiplexados e distribuídos ao longo dos enrolamentos (KIM *et al.*, 2008). Uma

**Figura 21 – Ilustração do espectro transmitido em forma de filtro passa-banda de um sensor de temperatura usando dois comprimentos de onda**



Fonte: Adaptada de Romero *et al.* (1997)

**Figura 22 – Em (a) o sinal de saída de um fotodiodo mostrando o espectro refletido de 4 picos que correspondem aos comprimentos de onda distribuídos, e (b) o sinal óptico multiplexado de temperatura interna do transformador, de sensores distribuídos nos enrolamentos, distribuição espacial de temperatura**



Fonte: Adaptada de (a) Lee *et al.* (2006) e (b) Kim *et al.* (2008)

análise de distribuição espacial de temperatura para o monitoramento e diagnóstico de falhas foi realizada, de forma a prolongar a vida útil do transformador. Obtiveram uma precisão de medição com resolução de  $\sim 0,6^\circ\text{C}$  e erro de linearidade menor que 0,4 %.

Os autores (CHENG *et al.*, 2010) criaram um sistema de medição de temperatura em linhas de transmissão usando um algoritmo baseado em sensores FBGs e filtro Fabry-Perot (FPF - *Fabry-Perot Filter*). Três sensores FBGs de referências de luz de banda larga foram usadas para eliminar a alteração do filtro induzida pela temperatura ambiente e a não linearidade do FPF. Além disso, dois sensores de temperatura FBG com diferentes sensibilidades à temperatura

foram usados para a medição. Wang *et al.* (2011) descrevem um sistema de monitoramento multiplexado de temperatura internamente em barras de um estator de um gerador de potência usando sensores FBG. Também os sensores quasi-distribuídos foram embarcados em algumas posições em tubos capilares metálicos de aço inoxidável, dando robustez para a fibra óptica. Os autores garantem que o encapsulamento, juntamente com os sensores, são resistentes a temperatura na ordem de 200 °C e pressão de 12 MP. O sistema utilizado pode ser visualizado na Figura 23.

**Figura 23 – Tubo capilar de aço inoxidável usado no encapsulamentos dos sensores FBG, dentro de uma barra do estator de um gerador de potência**



Fonte: Adaptada de Wang *et al.* (2011)

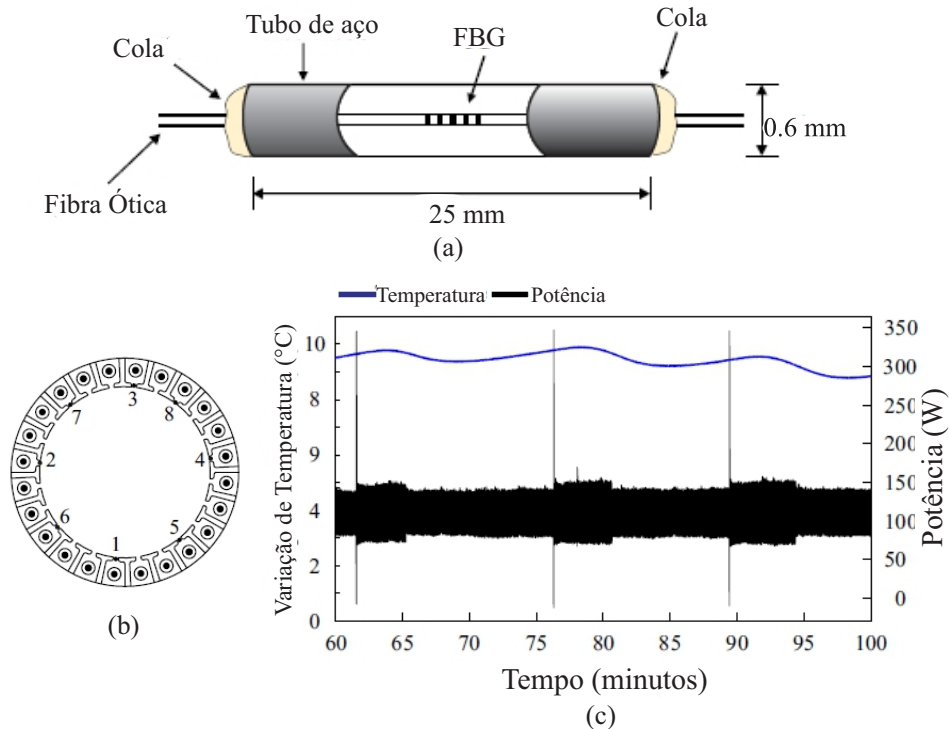
Técnica semelhante foi aplicada por (SOUSA *et al.*, 2011) usaram conjuntos de oito sensores FBGs cada para a instrumentação de um motor de indução trifásico de 3,7 kW/220 V/60 Hz. Cada conjunto de sensores foi distribuído simetricamente dentro do motor e posicionado entre as suas ranhuras. Um encapsulamento metálico também foi usado e é visto na Figura 24(a). O posicionamento dos sensores está mostrado na Figura 24(b). Também é destacada a oscilação da potência e o efeito proporcional sobre a temperatura do estator do motor de indução trifásico Figura 24(c).

Dreyer *et al.* (2017) desenvolveram um transdutor óptico multiparamétrico medindo simultaneamente temperatura e vibração em um hidrogerador de potência de 370 MVA. Os sensores FBGs de temperatura foram encapsulados em tubos de polibutileno e preenchidos com gel, semelhante a cabos ópticos padrão para telecomunicações. O sensores foram posicionados entre as barras do estator do gerador e monitoraram um período de 23 h. A Figura 25 apresenta a curva de temperatura do gerador e os resultados de seis sensores ópticos. O ponto A em destaque mostra uma falha no gerador, com parada da máquina, seguida por uma partida e na sequência funcionamento normal, estabilizando a temperatura em B, relatado por (DREYER *et al.*, 2017).

Percebe-se, por meio dos trabalhos descritos, que o encapsulamento dos sensores FBGs é uma alternativa consistente para a medição de temperatura internamente em máquinas elétricas de grande porte. Utilizar os sensores ópticos embarcados em polímeros produz a robustez que o

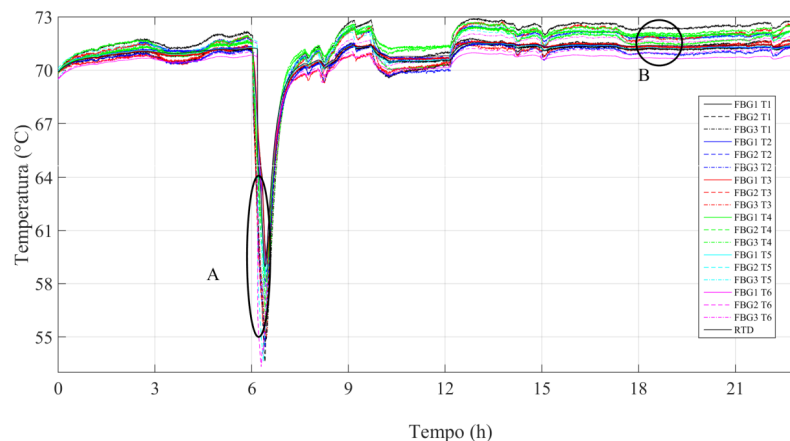


**Figura 24** – Em (a) tubo de aço inoxidável selado para encapsulamentos dos sensores FBG, dentro das ranhuras de um motor de indução. Em (b) vista em corte do motor mostrando o posicionamento dos conjuntos de sensores e (c) efeito do aumento da potência na proporcionalidade com a temperatura do estator



Fonte: Adaptada de Sousa *et al.* (2011)

**Figura 25** – Resultados de temperatura do estator, monitoramento de 23h para seis transdutores ópticos



Fonte: Adaptada de Dreyer *et al.* (2017)

sensor de fibra óptica não possui, mas sobressai a sua capacidade a isolamento elétrico. O trabalho aqui proposto destaca essa técnica de encapsulamento usando polímero em fibra de carbono reforçado. De fabricação simples, devido a capacidade de moldagem, além de ser compatível com qualquer geometria e dimensão de máquina elétrica, em especial o núcleo de transformadores.

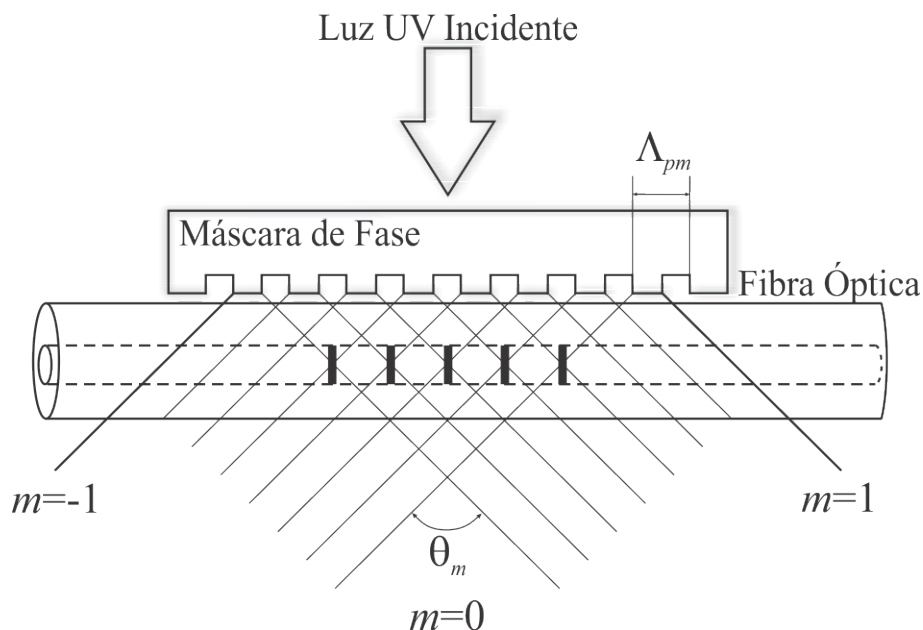
### 3 PROJETO, CARACTERIZAÇÃO E CALIBRAÇÃO DO SENSOR ENCAPSULADO EM MATERIAL COMPÓSITO

Neste capítulo será apresentado a metodologia de criação do projeto, a caracterização e a calibração dos sensores FBGs para medição de deformação e temperatura simultânea e diretamente no núcleo de um transformador. Os sensores foram encapsulados em compósito reforçado de fibra de carbono. Uma peça com geometria de clipe de engate rápido foi criada com o intuito de facilitar o acoplamento desses sensores diretamente ao núcleo de ferro do transformador à seco, melhorando a sensibilidade à deformação do sensor óptico.

#### 3.1 GRAVAÇÃO DE SENSORES EM FIBRA ÓPTICA

Para a gravação de todos os sensores FBGs usados neste trabalho, foi usada a técnica de máscara de fase. Esse método de gravação se dá pela iluminação direta de uma máscara de fase como elemento óptico difrator, gerando um padrão de interferência modular espacial do índice de refração no núcleo da fibra óptica. Esse diagrama é mostrado no Figura 26, que mostra um feixe de UV sendo incidido na máscara de fase, a intensidade de ordem zero é minimizada (normalmente menor do que 3 %).

**Figura 26 – Padrão periódico gravado em uma fibra óptica por meio de máscara de fase**



Fonte: Adaptada de Hill *et al.* (1993)

Por outro lado, os elementos de ordem +1 e -1 se maximizam, e essa combinação

gera um padrão de interferência no núcleo da fibra, de acordo com (HILL *et al.*, 1993). Essa interferência é gravada com uma modulação periódica  $\Lambda_{pm}$ . Uma fibra óptica monomodo padrão (SMF) foi usada para a gravação do sensor em seu núcleo. Um laser de argônio (ArF) ultravioleta (UV) emitindo em 193 nm e uma energia de pulso de 2,5 mJ e frequência de 250 Hz. As FBGs tem comprimento de onda centrado em uma faixa que pode variar de 1540 a 1555 nm e reflectâncias na ordem de até 75 % e uma largura de banda a meia onda de 0.27 nm. Um interrogador óptico de quatro canais DI410 (HBM<sup>®</sup>) é usado para obter os picos de comprimento de onda do sensor FBG a uma taxa de aquisição de 1 kHz. A Tabela 5 apresenta parâmetros gerais de utilização de equipamentos e fibras ópticas.

**Tabela 5 – Especificações gerais dos equipamentos e parâmetros ópticos das fibras ópticas utilizadas no projeto**

<b>Especificações ópticas</b>	
Laser Excímero (Xantos XS)	
Emissão de UV	193 nm
Energia de Pulso	25 mJ
Duração energia de pulso	5 ns
Comprimento de onda	157 to 800 nm
Redes de Bragg em fibra	
Máscara de fase (Ibsen)	193 nm
<i>Pitch</i> ( $\lambda_B$ ) sensor de deformação	1064.9 nm (1541 nm)
<i>Pitch</i> ( $\lambda_B$ ) sensor de temperatura	1073.5 nm (1553 nm)
Comprimento da rede	~ 3 mm
Faixa de comprimento de onda central	~ 1530 to 1558 nm
Largura de banda a meia onda (FWHM)	0.27 nm
Refletividade	70 %
Interrogador óptico	
DI410 (HBM) ou SM130 ( <i>Micron Optics</i> )	4 canais
Resolução	1 pm
Taxa de amostragem	1 ks/s
Faixa de taxa de aquisição	1 Hz to 1 kHz
Fibra óptica (GF1 B-dopada Thorlabs)	
Diâmetro casca	$125 \pm 1.5 \mu\text{m}$
Diâmetro revestimento	$250 \pm 20 \mu\text{m}$
Diâmetro núcleo	$9.0 \mu\text{m}$
Abertura numérica (nominal)	0.13
Comprimento de onda de operação (nominal)	1500 - 1600 nm

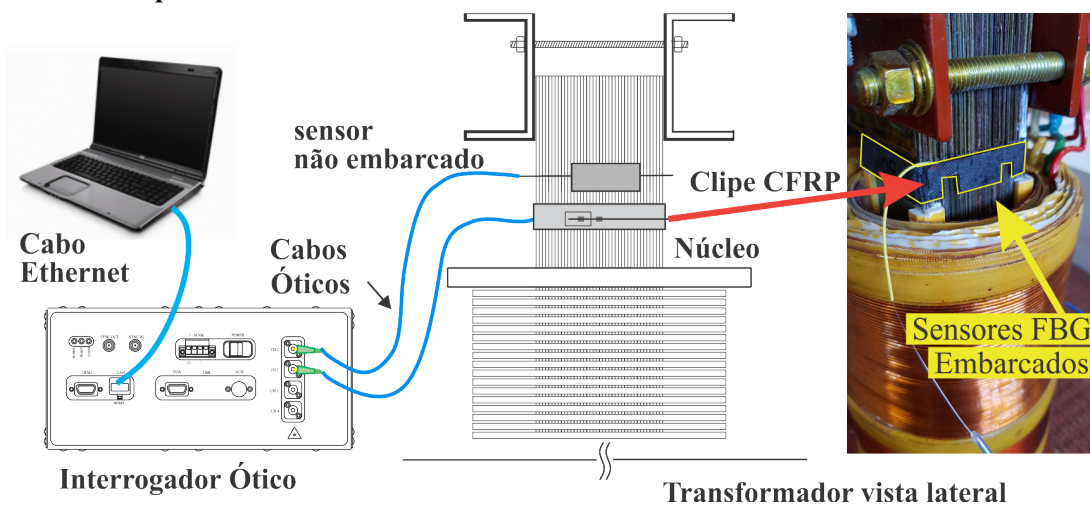
**Fonte: Autoria própria.**

### 3.2 CONFIGURAÇÃO EXPERIMENTAL PARA OS ENSAIOS NO TRANSFORMADOR

Um transformador a seco monofásico foi utilizado para os testes elétricos usando sensores FBGs para medição de deformação e temperatura do núcleo de ferro. O modelo do transformador tem as seguintes características elétricas: 3 kVA, 220/220 V, 13,6 A, 60 Hz. Diferentes cargas elétricas foram usadas para simular o funcionamento normal da rede elétrica, simulando cargas lineares e não-lineares. Basicamente três modelos de cargas elétricas foram usadas para os testes e serão levadas em consideração para estabelecer um modelo de comparação: à vazio, carga linear e carga não-linear. Para as cargas não lineares foram utilizados um retificador de meia onda com filtro capacitivo de  $35 \mu\text{F}/250 \text{ V}$  e banco de cargas resistivas de  $48,4 \Omega/1 \text{ kW}$ , valores individuais. Esse tipo de configuração produz uma corrente pulsada e, por isso, com uma elevada taxa de distorção harmônica na corrente de operação do transformador e o faz vibrar. Essa é a vibração mecânica no núcleo do transformador que será verificada e medida nos ensaios de cargas elétricas.

A configuração experimental é vista na Figura 27 e apresenta os sensores FBGs posicionados diretamente no núcleo do transformador e sua conexão ao interrogador óptico. E também, a conexão entre interrogador com o software *CatmanEasy* (HBM®) para a visualização e manipulação dos dados. O interrogador óptico utilizado é da marca *Micron Optics*® modelo SM130 ou similar DI410 da HBM, ambos de 4 canais ópticos e com 1 kHz de taxa de aquisição do sinal.

**Figura 27 – Configuração experimental do dispositivo de fibra de carbono com sensores ópticos embarcados. Clipe posicionado diretamente no núcleo do transformador. Conexões óptica e rede local**



Fonte: Autoria própria

Nos ensaios elétricos realizados, três sensores FBGs foram monitorados, um deles colado diretamente no núcleo de ferro do transformador e que servirá de base comparativa aos resultados dos outros dois sensores embarcados em um clipe de fibra de carbono, um de deformação, outro de temperatura. Os resultados serão apresentados no próximo capítulo.

### 3.3 DESENVOLVIMENTO DE UM CLIPE DE CFRP PARA ENGATE RÁPIDO

A proposta é projetar e desenvolver um clipe de engate rápido ao núcleo de ferro do transformador, e com sensores ópticos incorporados a sua estrutura, que seja capaz de medir deformação e temperatura simultaneamente. Esse dispositivo fará a medição diretamente acoplado ao núcleo de ferro e pode ser alterado para qualquer modelo de transformador. Algumas características como fácil instalação ou acoplamento ao núcleo do transformador, oferecem proteção aos sensores ópticos, em virtude de características mecânicas específicas do polímero como módulo de Young. Sobretudo, o compósito não é condutor, podendo ser instalado internamente aos transformadores sem oferecer riscos de curto-circuito, correntes de fuga, aquecimento por correntes induzidas. O projeto do clipe engate rápido foi baseado inicialmente em simulações de elementos finitos (FEM). Depois da definição de geometria, foi realizada a montagem do clipe em CFRP. Na sequência dos procedimentos, foi realizado o processo de incorporação dos sensores ópticos ao clipe. Essa sequência será descrita passo a passo para mostrar a reprodutibilidade do dispositivo como um todo.

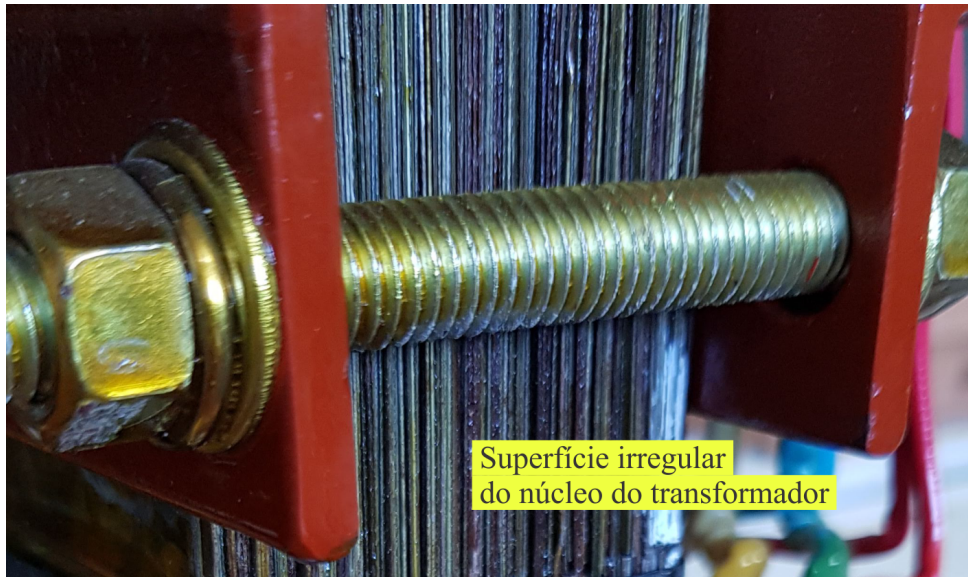
#### 3.3.1 Simulação em Elementos Finitos

No processo de desenvolvimento do clipe foram levadas em consideração duas importantes características que o dispositivo deve ter: facilidade de instalação e robustez mecânica. Para garantir essas condições, deve-se ter agilidade no processo de colagem e fixação dos sensores ao núcleo de ferro do transformador e garantir proteção mecânica aos sensores ópticos, visto que no processo de gravação das FBGs na fibra óptica, a própria incidência do laser fragiliza a região gravada. Nessa condição de gravação, o revestimento da fibra óptica é retirado, e por isso é tão importante embebê-la em CFRP para proteção mecânica das redes de Bragg.

A fixação de um sensor FBG em superfícies que não tenham uma boa adesão à cola, ou simplesmente que a superfície não seja plana, dificulta o processo de colagem. Colas como o cianoacrilato são muito usadas em aplicações com sensores ópticos, mas sua composição é

bastante líquida, sendo assim, é de difícil adesão onde não exista uma superfície lisa suficiente para aderí-la. Esse é o caso das chapas justapostas do núcleo de ferro de um transformador, visto em ampliação na Figura 28. Por essa razão, o desenvolvimento de um dispositivo que forneça a facilidade de manuseio e instalação com segurança, e que agilize todo o processo de fixação dos sensores ópticos se torna importante para a aplicação no núcleo de transformadores.

**Figura 28 – Foto do núcleo do transformador em destaque para a superfície lateral criada pela sobreposição irregular das chapas justapostas.**



**Fonte: Autoria própria**

O desenvolvimento de um dispositivo que não influencie no funcionamento normal da máquina é outro ponto importante. Um material que tem características mecânicas semelhante a dos metais, módulo de elasticidade, rigidez, entre outras, mas de fácil moldagem e também isolante, é o compósito reforçado em fibra de carbono (CFRP). As principais propriedades do material de fibra de carbono pode ser visto na Tabela 6.

A utilização da simulação em elementos finitos permite definir a geometria do clipe com mais sensibilidade nos pontos onde os sensores FBGs são incorporados ao compósito. Além dessas características, é possível definir também as dimensões, como: comprimento, largura, altura e principalmente a espessura do clipe, que representa a quantidade de camadas de fibra de carbono utilizadas. É possível determinar inclusive, a geometria da face onde os sensores são colados, essa geometria deve ter a função de aprimorar a sensibilidade do sensor óptico. A escolha de um modelo, que melhora a sensibilidade do sensor de deformação, foi imprescindível para a determinação dos resultados apresentados pelo clipe de CFRP. Houve uma preocupação para deixar a estrutura balanceada, entre ser robusta mecanicamente e ao mesmo tempo não ser

**Tabela 6 – Propriedades da fibra de carbono em epóxi UD Prepreg e características que foram utilizadas na simulação em FEM**

Propriedades	Valor
Densidade	1.490 kg m <sup>-3</sup>
Coefficiente de expansão térmica direção X	-474 × 10 <sup>-06</sup> °C <sup>-1</sup>
Coefficiente de expansão térmica direção Y	0,3 × 10 <sup>-06</sup> °C <sup>-1</sup>
Coefficiente de expansão térmica direção Z	0,3 × 10 <sup>-06</sup> °C <sup>-1</sup>
Módulo de Young direção X	121.000 MPa
Módulo de Young direção Y	8.600 MPa
Módulo de Young direção Z	8.600 MPa
Razão de Poisson XY	0,27
Razão de Poisson YZ	0,4
Razão de Poisson XZ	0,27
Número de nós da rede	4.855
Número de elementos da rede	2.016
Força aplicada FEM	1 N

**Fonte: Autoria própria.**

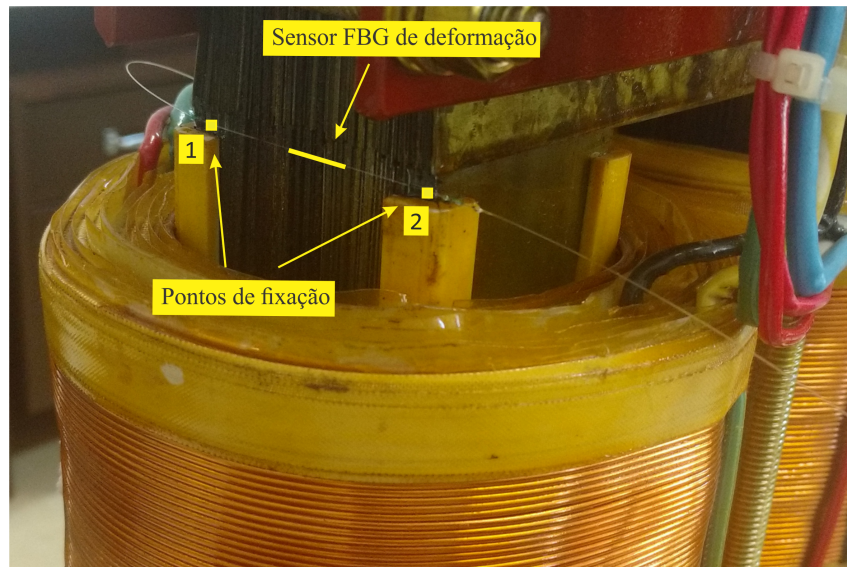
muito rígida, o que provoca a perda de sinal de deformação. Uma análise estática e dinâmica foi realizada no programa ANSYS 2019 R1.

Alguns modelos foram simulados com a preocupação principal de identificar pontos de maior deformação do clipe, afim de garantir os melhores pontos de fixação do sensor de deformação. Esses modelos são apresentados a seguir e mostram a simulação em elementos finitos. Um ensaio experimental preliminar também foi realizado no transformador para determinar a força vibracional entre as chapas justapostas do núcleo do transformador. Uma fibra óptica com sensor FBG foi submetida ao funcionamento do transformador, medindo-se sua deformação. Conhecendo a deformação do sensor, é possível determinar qual a força exercida do núcleo na fibra óptica. Esse resultado foi a força de aproximadamente 1,02 N detectado pelo sensor óptico.

Para que as análises de simulação tenham validade, é apresentada a forma de determinação da força de 1 N do núcleo atuando sobre o sensor FBG. O sensor FBG que mostrado na Figura 29 foi colado transversalmente ao secundário do núcleo do transformador, quando este está em funcionamento com carga linear resistiva.

Um dos principais problemas de fixação do sensor encontrados ao colá-lo no núcleo é que o próprio núcleo é formado por chapas justapostas e, de certa forma, desalinhadas. Ao usar a cola cianoacrilato, identificou-se que era uma cola líquida de pouca viscosidade, ocasionando da cola escorrer por entre as placas do núcleo, não fixando o sensor. Buscou-se outra abordagem

**Figura 29 – Foto do transformador com sensor FBG colado transversalmente ao seu núcleo. A cola utilizada foi de base epóxi.**



**Fonte: Autoria própria**

usando a cola epóxi, com a possibilidade de alteração da viscosidade conforme tempo de manipulação e secagem. O resultado de fixação do sensor foi considerado adequado, mas os tempos de secagem determinados pelo fabricante excedem a oito horas de cura, o que de certa forma, dificulta o uso do sensor, pois são dois pontos de ancoragem. Foram necessários dois momentos de fixação, no primeiro a fibra óptica foi colada ao ponto de ancoragem 1 e após cura da cola epóxi, no segundo momento, a fibra óptica foi então tracionada e colada no ponto 2, como mostrado na Figura 29. Somente após os períodos de cura do epóxi em ambos os pontos, iniciaram-se os ensaios elétricos.

Ao aplicar-se conceitos de mecânica e conhecendo a Lei de Hooke, a resposta de deformação do núcleo do transformador é a força que esse mesmo núcleo exerce sobre as paredes laterais do clipe. Essa força foi determinada analiticamente conforme a Lei de Hooke. Três equações foram usadas para determinar a força que a fibra óptica recebe do núcleo. Adota-se a Lei de Hooke, na Equação 11:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon, \quad (11)$$

em que  $\sigma$  é a tensão mecânica da fibra óptica,  $E$  é o módulo de elasticidade da fibra óptica,  $\varepsilon$  é a deformação sofrida pela fibra óptica, e sabendo que a tensão mecânica  $\sigma$  também é expressa como força pela área da seção transversal da fibra, então chega-se a Equação 12:

$$\sigma = \frac{F}{A}, \quad (12)$$



onde  $A$  é área da seção transversal da fibra óptica igual a  $12,27 \text{ nm}^2$  e  $F$  é a força desejada. Já a deformação da fibra óptica é dada pela Equação 13:

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l}, \quad (13)$$

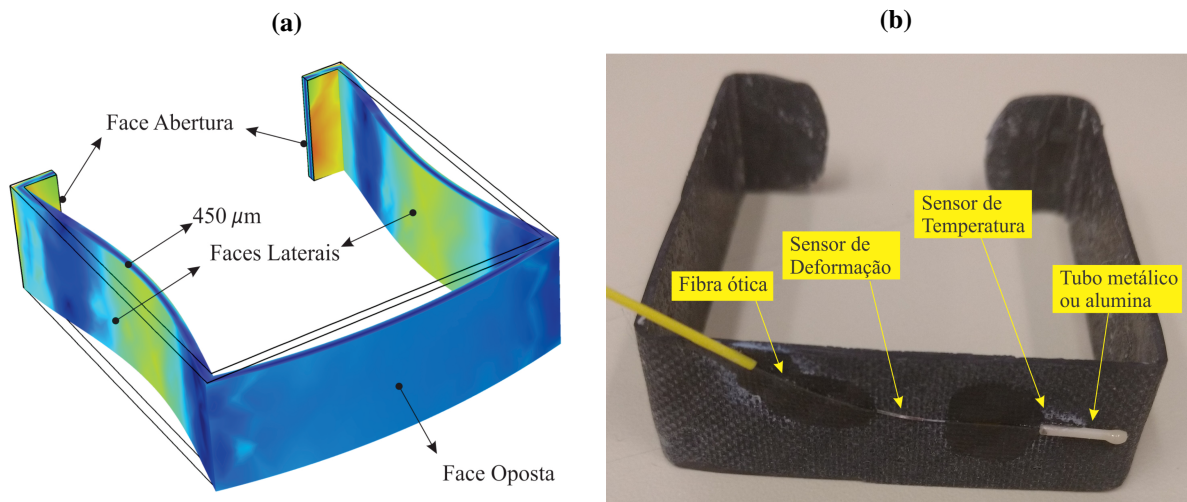
em que  $\Delta l$  é o alongamento da fibra óptica e  $l$  é o comprimento total da rede de Bragg. Com a realização de teste experimental com uma FBG colada transversalmente ao núcleo do transformador, e esse operando com carga linear, determinou-se a deformação  $\varepsilon$  sofrida pelo sensor FBG. Com o módulo de elasticidade da fibra óptica e a deformação, consegue-se calcular a tensão mecânica (força que a deformou). Assim, conhecendo a área de seção transversal da fibra óptica permite calcular essa força aplicada à fibra óptica pelo núcleo do transformador, que foi de aproximadamente 1,02 N. Então, essa é a magnitude da força que o núcleo aplica para deformar o sensor FBG colado transversalmente a esse núcleo de ferro sob condições de carga linear resistiva. Portanto, como 1,02 N foi determinado experimentalmente, esse foi o valor considerado para todas as simulações em elementos finitos, e por questões de arredondamento, 1 N passou a ser adotado como valor de referência.

Para a análise estática do clipe estudou-se a deformação máxima e os respectivos modos vibracionais, que são as frequências naturais de vibração da peça. Uma primeira geometria para o clipe foi projetada para testes em FEM e montada em CFRP para os testes experimentais, como visto nas Figuras 30(a) e 30(b), respectivamente. As geometrias testadas focam na deformação da face onde são colados os sensores ópticos. Nota-se na simulação que há deformação no clipe, mas não na face dos sensores FBGs. Essa geometria inteiriça obteve uma deformação nas faces laterais, de aproximadamente  $450 \mu\text{m}$ , mas praticamente nula na face de interesse.

Lembra-se que esse posicionamento na face oposta a abertura de encaixe se deu justamente para facilitar o encaixe do clipe ao núcleo. Dessa forma, garantir que sofram menos esforços externos no momento do encaixe. O encaixe do clipe ao núcleo se dá de forma menos problemática, sem envolver o núcleo pela parte mais central e congestionada pelos próprios enrolamentos do transformador. Portanto, todas as simulações levam em consideração esse aspecto e em todas as geometrias simuladas foram observadas e comparadas pela deformação na face oposta a abertura. Na busca por geometrias que melhorem transferência de vibração ao sensor, algumas diferentes geometrias da face dos sensores foram simuladas, fabricadas em CFRP e testadas experimentalmente.

Outras geometrias foram analisadas e foram destacadas a seguir. Essas geometrias apresentam uma evolução das simulações na busca pela geometria adequada para a aplicação.

**Figura 30 – Primeiro clipe projetado, face dos sensores rígida. (a) Simulação de análise estática de deformação. Geometria sem cortes na face do sensor. (b) Foto da estrutura do clipe projetada e construída em CFRP. Faces inteiriças e alta rigidez mecânica.**

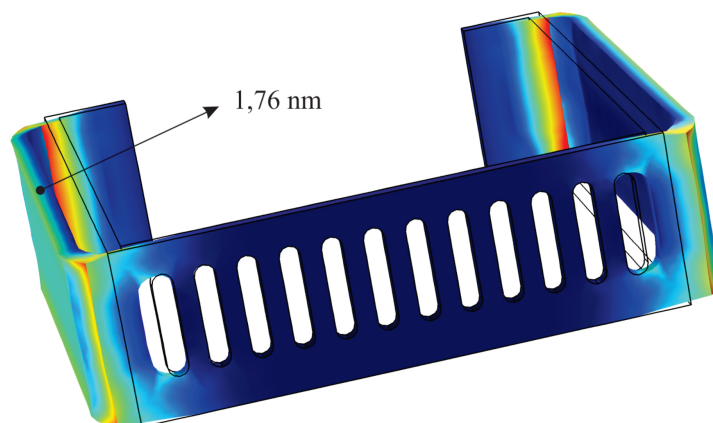


**Fonte: Autoria própria**

Na Figura 30(b) observa-se o clipe projetado em CFRP sem cortes na face dos sensores e sem camada externa de compósito.

A geometria da Figura 31 foi simulada, com vazados paralelos, numa tentativa de reduzir a rigidez que o formato inteiriço produziu. Esse formato também teve seus modos vibracionais principais nas faces laterais, com valores muito baixos (1,76 nm), na ordem de 2500 vezes menor do que o anterior e fora da face oposta, ou seja, praticamente nula, sendo descartada. Lembra-se que a figura apresentada pelo software ANSYS mostra a deformação sofrida pela peça de forma mais ampliada para visualização do usuário, é importante cuidar com as distorções visuais, levando em consideração o valor da grandeza.

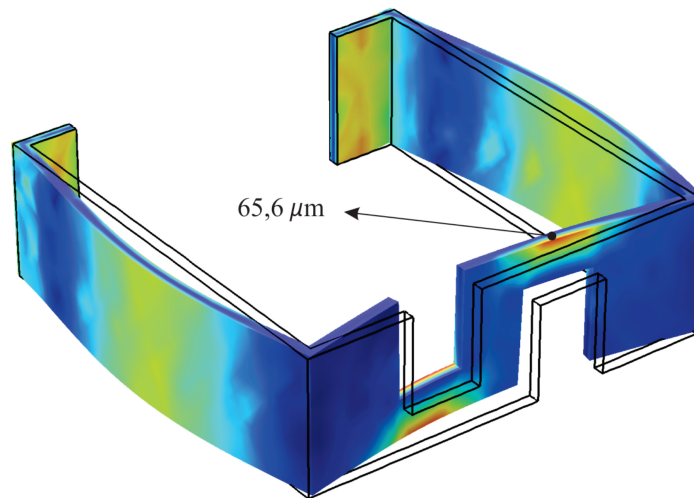
**Figura 31 – Simulação de análise estática de deformação. Geometria com vazados paralelos.**



**Fonte: Autoria própria**

Para a geometria mostrada na Figura 32 em formato de mola na face oposta, houve uma deformação na ordem de  $65,6 \mu\text{m}$ . Boa parte dos modos vibracionais foram deslocados para a face oposta, garantindo uma boa deformação nos pontos onde se deseja realizar a fixação dos sensores. Essa geometria foi então adotada e passou a ser melhor detalhada. Foram realizadas simulações variando, tanto o posicionamento dos espaços vazios na face onde os sensores são posicionados, e também o número e grandezas desses espaçamentos. Isso garantiu um ajuste adequado entre rigidez e sensibilidade da peça. Essas duas grandezas precisam estar equalizadas, pois muita rigidez provoca a perda da sensibilidade do sinal óptico, entretanto, uma melhor sensibilidade deixa a peça menos robusta e com muitos pontos de fragilidade, possibilidade de fraturas, principalmente no momento do encaixe no núcleo. Depois de escolhida a geometria conforme as deformações sofridas pela face principal, inúmeras simulações relacionadas a espessura do clipe também foram realizadas e serão apresentadas na sequência.

**Figura 32 – Simulação de análise estática de deformação. Geometria em formato de mola**

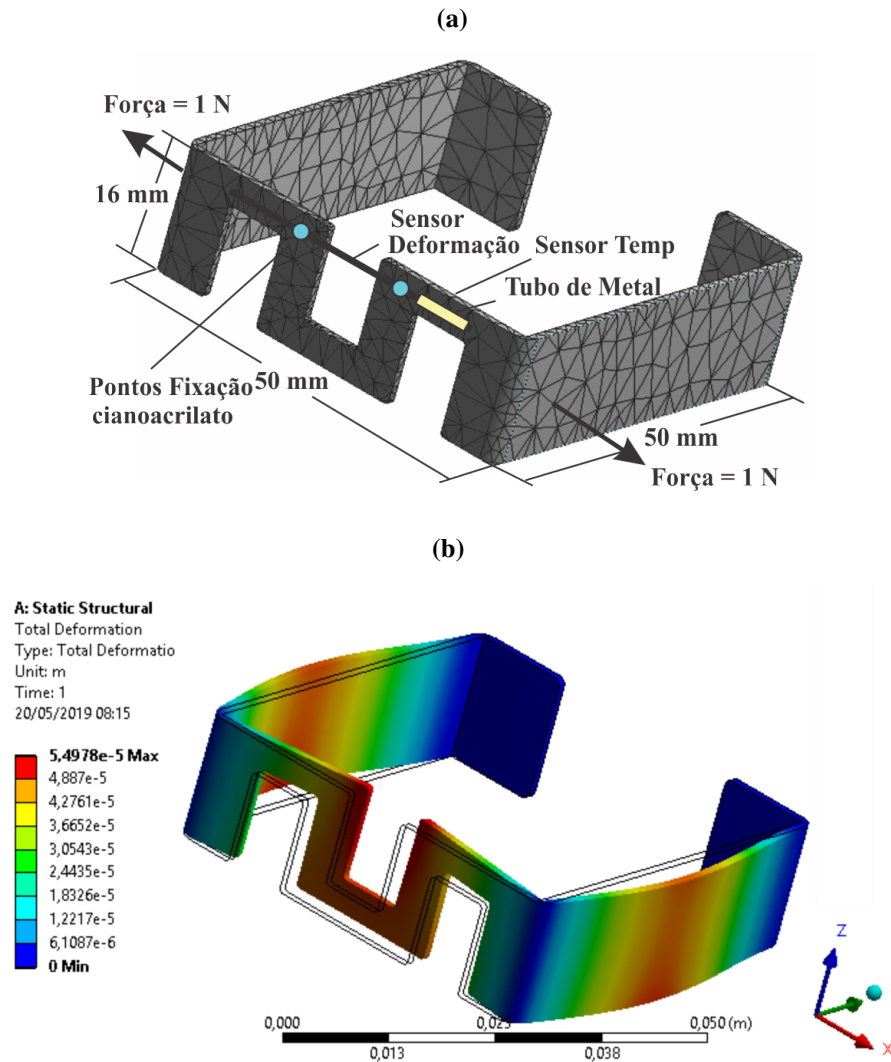


**Fonte: Autoria própria**

Para a determinação dos modos vibracionais de cada modelo, a força de 1 N determinada experimentalmente foi aplicada a simulação. Essa força é aplicada em dois pontos distintos do clipe, localizadas em direções opostas vistas na Figura 33(a). Elas representam a força que o núcleo do transformador aplica sobre as faces laterais do clipe e foram determinadas pelas Equações 11, 12 e 13. O número de nós e elementos da malha de elementos finitos considerados para a simulação, foi de 4855 e 2016, respectivamente. A Figura 33(a) representa o modelo final.

O formato da face principal que comporta os sensores, com três vazados foi o que apresentou melhores resultados de deformação máxima pela simulação em FEM. A deformação

**Figura 33 – Estrutura final adotada (a) Método de elementos finitos. Força externa aplicada ao clipe e número de nós e elementos. (b) Simulação de análise estática de deformação. Geometria em formato de mola com 3 vazados. Estrutura de aspecto final do dispositivo.**



Fonte: Autoria própria

total dessa geometria teve valor de aproximadamente  $54,98 \mu\text{m}$ , com deformação máxima no ponto onde serão colados os sensores FBGs. A Figura 33(a) apresenta essa situação do posicionamento das FBGs.

Com a definição da geometria, foi possível variar apenas a espessura da peça, que representa a quantidade de camadas de compósito de carbono que serão moldadas ao clipe. Então, variando as camadas de compósito de fibra de carbono, garante-se uma boa relação rigidez/sensibilidade. A função da resposta em frequência mostra as frequências naturais do clipe e norteiam quais faixas lineares serão escolhidas para a construção do clipe. É importante determinar essas faixas de frequências lineares para que frequências naturais do clipe, assim não

Tabela 7 – Comparação de deformações máximas FEM entre modelos de clipe

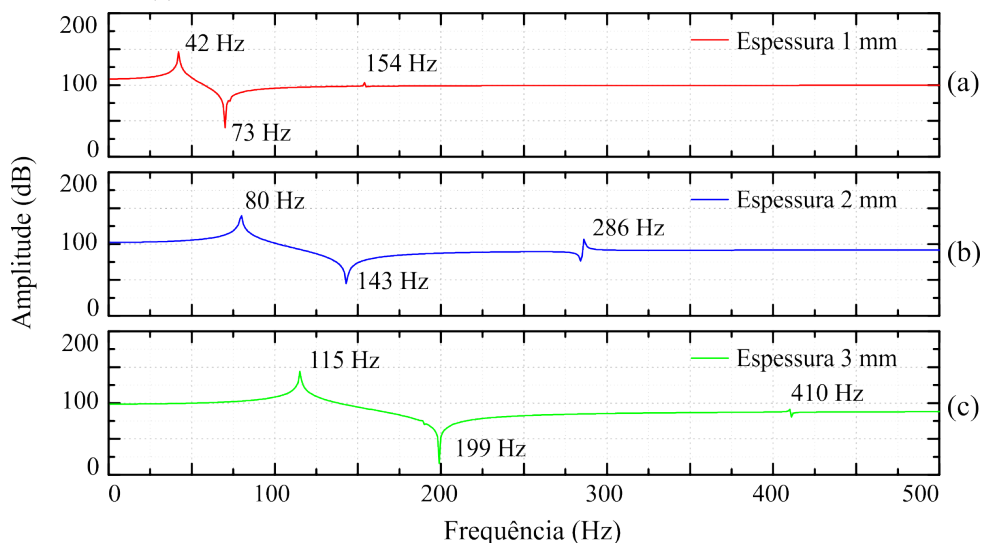
Formato da Face	Deformação	Observação
Inteiriça	~450,0 $\mu\text{m}$	Melhor amplitude de deformação, mas apenas nas faces laterais. Face dos sensores desprezível.
Vazados paralelos	~1,8 nm	Nenhuma deformação na face dos sensores. Amplitude nas faces laterais baixa em "nm".
Mola 2 vazados	~65,6 $\mu\text{m}$	Boa amplitude, entretanto as deformações estão na borda dos vazados. Posição dos sensores sem deformação.
Mola 3 vazados	~54,9 $\mu\text{m}$	Geometria com boa amplitude de deformação. A posição dos sensores é a que sofre maior deformação. Modelo adotado.

Fonte: Autoria própria.

há interferência na leitura do sensor FBG da frequência fundamental elétrica e seus harmônicos e principalmente nas frequências mecânicas do transformador. As frequências elétricas aparecem em suas componentes fundamental (60 Hz) e harmônicas (180, 300 Hz e superiores), já as frequências mecânicas tem sua fundamental em 120 Hz e harmônicas 240 Hz e superiores, de acordo com (PICHER *et al.*, 2013; YOUSOF *et al.*, 2015). A faixa de interesse de leitura vai de 0 a 500 Hz, que são as baixas frequências, principais causadores de vibração mecânica no núcleo do transformador. Caso necessite-se medição em regiões de frequências mais altas, basta adicionar rigidez ao clipe, aumentando a quantidade de camadas do mesmo.

A Figura 34 apresenta a simulação da FRF com a variação da espessura do clipe inteiriço para 1mm, 2mm e 3 mm.

Figura 34 – Análise da função da resposta em frequência do clipe inteiriço de CFRP e variação da espessura do clipe, com 1 mm em (a), 2 mm em (b) e 3 mm em (c).



Fonte: Autoria própria

Na Figura 34(a) tem-se a simulação da FRF para 1 mm de espessura, o primeiro modo vibracional aparece em 42 Hz, o segundo em 73 Hz e o terceiro em 154 Hz. Após esse terceiro modo, uma região linear interessante de trabalho para os sensores de medição de vibrações no núcleo, pois sabe-se que estes tem uma frequência de vibração na faixa de 0 a 600 Hz, de acordo com (KUN *et al.*, 2014) e (ZHANG *et al.*, 2015). Na Figura 34(b) e (c) a curva da FRF é semelhante, aumentando-se a espessura, uma maior rigidez é incrementada ao clipe de fibra de carbono. Assim, os modos vibracionais aparecem com amplitude característica da peça, mas deslocados em frequência, com possibilidade de ajustes dependendo das características de construtivas e de operação de cada transformador a ser examinado.

As frequências naturais apresentadas na Figura 34 são do primeiro, segundo e terceiro modo vibracional da peça inteira e denotam a capacidade do projeto em variar faixas lineares de interesse de medição. Por exemplo, na Figura 34(a) há uma faixa linear compreendida entre 75 e 500 Hz onde apenas o terceiro modo vibracional está contido nesse intervalo. Além disso, os dois picos em 42 e 73 Hz não interferem em uma leitura de 60 Hz do transformador, por exemplo.

### 3.3.2 Processo de Fabricação do clipe de CFRP

Um molde do núcleo do transformador foi criado em alumínio maciço, e pode ser visto na Figura 35, contendo as dimensões exatas de comprimento e largura do núcleo do transformador. O molde foi criado apenas para a fabricação do clipe, não sendo usado para simulações ou experimentos para análise do comportamento vibracional do núcleo do transformador. Um ponto importante na fabricação da estrutura em compósito é a dimensão interna do clipe, pois para que haja um encaixe perfeito, o molde maciço em alumínio, e de dimensões  $50 \times 50 \times 18$  mm, teve que ser usinado em máquina de Controle Numérico Computadorizado (CNC), para maior exatidão.

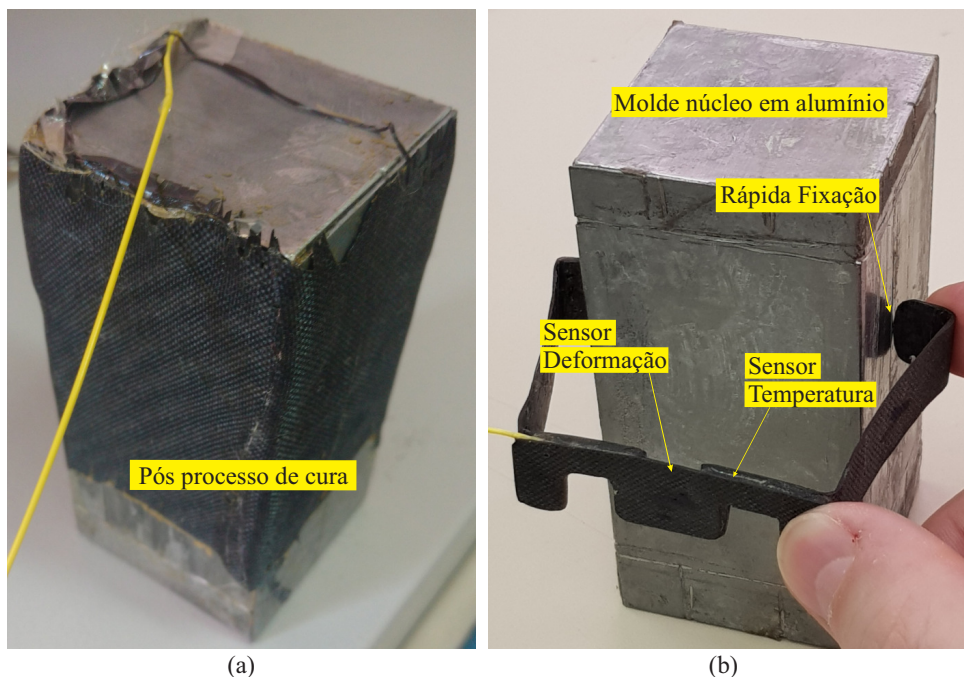
O polímero utilizado é composto por camadas de tecido de fibra de carbono e resina epóxi. O tecido é formado por trama de sarja de  $200 \text{ g/m}^2$  e a temperatura de transição vítrea é aproximadamente  $T_g = 400 \text{ }^\circ\text{C}$ . Cada camada de tecido então é recortada conforme o tamanho especificado pelo molde e cada uma delas é impregnada com com resina e endurecedor (A:B) numa proporção de 2:1. A marca da resina é Dow Chemical Company do modelo DER331 e agente de cura 043. Após a impregnação, cada camada é posicionada em torno do molde de alumínio. O molde recebe uma camada de cera desmoldante para facilitar a separação entre o

molde e a fibra de carbono.

Ao final da moldagem das camadas, é colocado um tecido desmoldante para dar acabamento à parte externa da peça e também para que o plástico usado na câmara de vácuo não seja aderido pela fibra de carbono. O número de camadas utilizadas foi duas, determinado pelos resultados da simulação em FEM. A resina epóxi impregnada no compósito passa por um processo de secagem e cura sob condições de vácuo na primeira hora para retirada dos excessos de ar e boa aderência geométrica no molde. Nessa primeira hora o forno permanece a 80 °C e as próximas 8 a 12 h o forno é incrementado para 120 °C, conforme relatam Galvão *et al.* (2016), Galvão *et al.* (2017). Terminado o processo de cura da resina, o clipe é desmoldado e dá-se início ao processo de usinagem do formato de clipe. Para a usinagem da peça usa-se uma micro-retífica para corte, lixamento e acabamento da peça.

Finalizada a etapa de usinagem, se dá a colagem dos sensores de deformação e temperatura nessa camada base do clipe, usando cola do tipo cianoacrilato (Loctite - Super Bonder). O sensor de temperatura é inserido em um tubo metálico de aço inox ou de alumina, evitando dessa forma sofrer deformações ou expansão térmica. Uma das pontas desse tubo metálico é preenchido com cola epóxi e a outra extremidade fica livre. Dessa maneira isola-se o sensor de temperatura que passa a sofrer influência apenas da temperatura do núcleo do transformador. A

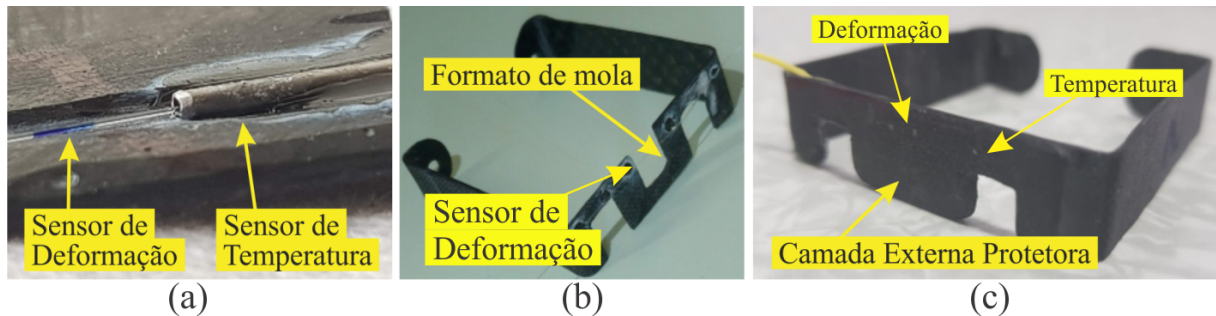
**Figura 35 – Molde do núcleo em alumínio usado para fabricação dando o formato de clipe. (a) Etapa de cura finalizada, seguinte desmoldar e retificar. (b) Clipe geometria final de engate rápido**



Fonte: Autoria própria

Figura 36 apresenta essas etapas.

**Figura 36 – Em (a) os dois sensores posicionados e colados em um sulco na camada de fibra de carbono, (b) o formato em mola do clipe e (c) clipe formato final com camada protetora dos sensores**



Fonte: Autoria própria

Outras informações também estão detalhadas nos itens [22-31] do Apêndice B - Descrição da patente, que foi depositada sob o processo INPI número: BR 10 2018 067921 0, de outubro/2018.

### 3.3.3 Ensaios de Calibração de Temperatura

Depois de toda a estrutura em fibra de carbono pronta e os sensores encapsulados no compósito, começa a etapa de calibração de temperatura do sensor FBG. Essa etapa foi realizada em um equipamento banho térmico do fabricante Lauda Eco Gold. O processo se deu marcando uma temperatura inicial, outra final, um incremento, e um tempo de estabilização da temperatura. O banho térmico operou de 25 a 85 °C e decresceu nas mesmas condições, repetindo-se o ensaio 10 vezes. Os testes seguiram conforme características descritas na Tabela 8:

**Tabela 8 – Características do ensaio de banho térmico do sensor FBG de temperatura**

Descrição das Etapas	Valor
Número de degraus	7
Tempo de duração de cada degrau	10 min
Temperatura inicial	25 °C
Incremento do degrau de temperatura	10 °C
Temperatura final	85 °C
Número de ensaios totais	10
Variação de temperatura do equipamento	0,05 °C

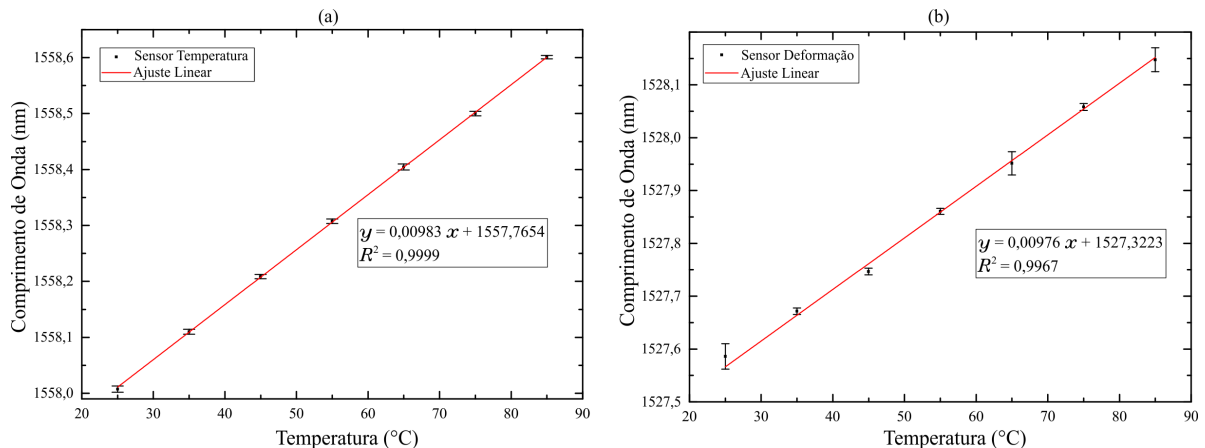
Fonte: Autoria própria.

O resultado estatístico dos 10 ensaios, a reta de ajuste linear e o coeficiente de correlação são apresentados na Figura 37. É possível verificar a sensibilidade do sensor de temperatura



de 9,83 pm/°C, de acordo com o coeficiente de reta de ajuste linear e coeficiente de correlação quadrático  $R^2 = 0,9999$  na Figura 37(a). Para o sensor de deformação, a sensibilidade foi de 9,76 pm/°C, com ajuste linear e coeficiente de correlação quadrático de  $R^2 = 0,9967$ , Figura 37(b). Comparando o sensor de temperatura com o sensor de deformação, nota-se alguns erros, incertezas residuais em pontos como 25 e 85 °C. Esses são os pontos de inversão das rampas de aquecimento e resfriamento. São os momentos onde há a inversão do controle de temperatura, fazendo com que o banho térmico tenha maior circulação de fluido, gerando no sensor de deformação um fluxo indesejado, visto que este sensor se encontra exposto, ao contrário do sensor de temperatura que está encapsulado pelo tubo de alumina. Também ocorrem incertezas na medição devido a dispersão nas amostras do sensor óptico, incertezas da regressão linear (desvio padrão), incertezas do próprio banho térmico e do interrogador óptico.

**Figura 37 – Ensaio de banho térmico com o sensor de temperatura (a) e deformação (b) encapsulados no compósito de fibra de carbono. Reta de ajuste linear e coeficiente de correção para ambos os sensores ópticos.**



Fonte: Autoria própria

Conforme literatura, Othonos (1997) relata que a sensibilidade de uma fibra monomodo padrão (SMF) é de 12 a 15 pm/°C. No entanto, utilizando uma fibra SMF padrão, no Laboratório de Engenharia de Sistemas Optoeletrônicos (LabESO) é habitual em testes térmicos uma sensibilidade de 10 pm/°C, de acordo com Dreyer *et al.* (2017). Esse sensor FBG de temperatura será usado para eliminar o efeito da temperatura no sensor FBG de deformação. E nesse caso, há um melhoramento da sensibilidade do sensor FBG de deformação devido o uso do clipe em formato de mola. Esses resultados serão apresentados no capítulo seguinte.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão apresentados os resultados da simulação dinâmica em elementos finitos. Apresentar-se-á também uma comparação entre três métodos para a determinação da função da resposta em frequência do clipe, para identificar qual a faixa adequada de medição de deformação no núcleo do transformador. O primeiro método utilizado foi a simulação harmônica aplicando uma força em uma das faces laterais do clipe e um ponto de medição na face lateral oposta a da força aplicada. Essa simulação estimula o clipe de forma que se obtenha a FRF, ou seja, seus modos vibracionais. No segundo método usa-se um martelo de impacto e um acelerômetro. Esse é um teste experimental, onde aplica-se uma força externa, por meio do martelo de impacto com ponteira de nylon, e mede-se o comportamento da resposta em frequência pela leitura apresentada pelo acelerômetro. O terceiro método é a leitura apresentada pelo sensor de deformação embarcado no clipe e que irá retornar a FRF da mesma força originada pelo martelo de impacto. Então o segundo e terceiro método são obtidos no mesmo ensaio, mas de formas diferentes, uma resposta mecânica, outra óptica.

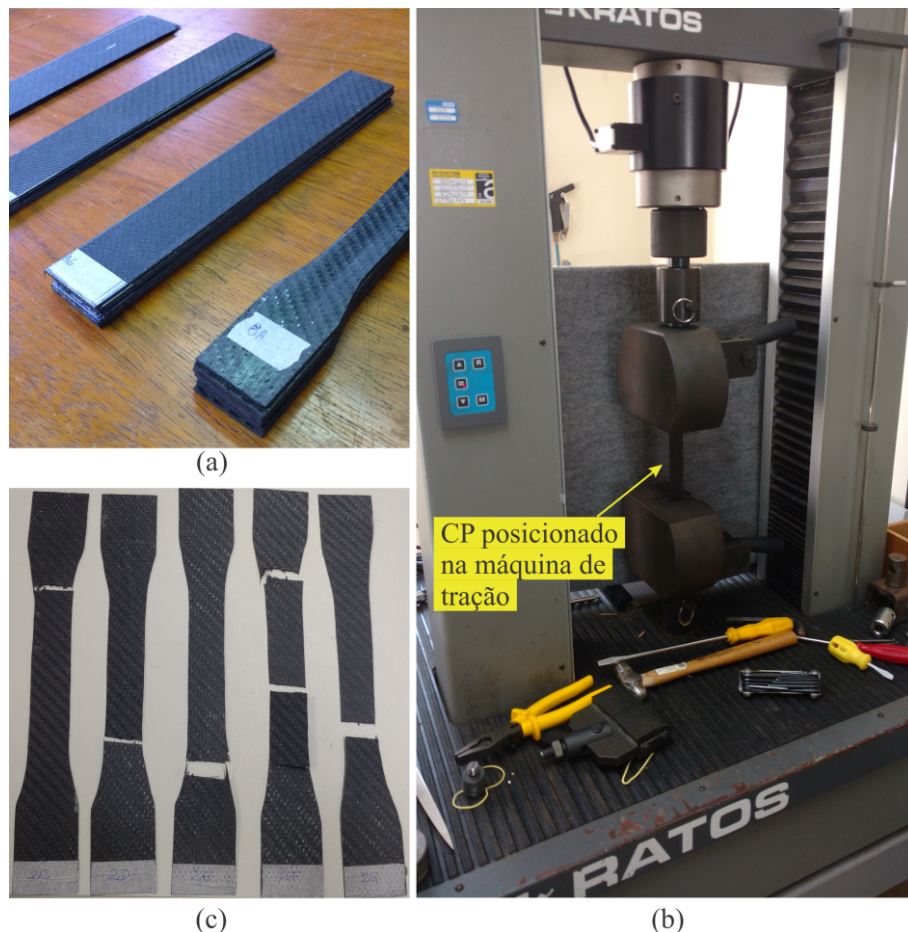
Um teste de deformação do núcleo ainda será apresentado, afim de comparação com a deformação sofrida pelo núcleo na simulação em FEM. Essa simulação ocorre na mesma característica que o teste experimental do transformador com carga elétrica puramente resistiva. Um ensaio térmico também será mostrado afim de realizar uma compensação de temperatura para o sensor de deformação. Uma resposta de temperatura no tempo é avaliada e será apresentada, além de comparada com a leitura de temperatura de um pirômetro a laser.

Por fim, serão apresentados resultados eletromecânicos do sensor de deformação embarcado no compósito, onde três tipos diferentes de cargas elétricas serão submetidas ao transformador: à vazio, carga linear e carga não-linear. Todos os resultados elétricos serão comparados a um sensor óptico colado livre e diretamente no núcleo de transformador, lembrando que esse sensor FBG colado diretamente não possui compensação de temperatura. Para cada situação de carga elétrica, o comportamento da corrente elétrica no transformador e a resposta em frequência de vibração do núcleo será mostrada. Em todos os ensaios elétricos, a corrente foi medida no braço primário do transformador. Importante destacar que o equipamento está operando de forma normal, em regime permanente, sem apresentar qualquer tipo de falha mecânica ou elétrica.

#### 4.1 LEVANTAMENTO DE PARÂMETROS MECÂNICOS DO CFRP

Assume-se que o material adotado para o clipe, o CFRP é uma mola linear. Para tal condição foi realizado um ensaio de tração e ruptura, onde oito corpos de prova de fibra de carbono de quatro diferentes espessuras foram submetidos ao esforço. O ensaio ocorreu no Laboratório de Madeiras do Centro de Tecnologia de Materiais, do TECPAR<sup>1</sup> (Instituto de Tecnologia do Paraná). Foram produzidos corpos de prova (CP) de fibra de carbono no formato de “gravata”, conforme norma técnica da ASTM n° 3.039 - *Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials*. O processo de fabricação dos CPs são os mesmos utilizados e descritos na seção 3.3.2. Na Figura 38(a) os CPs com o primeiro formato retangular e posteriormente no formato de gravata prontos para ensaio destrutivo.

**Figura 38 – Em (a) CPs sendo preparados no formato de gravata. Em (b) a máquina de tração e (c) os CPs pós ensaios, todos rompidos.**



**Fonte: Autoria própria**

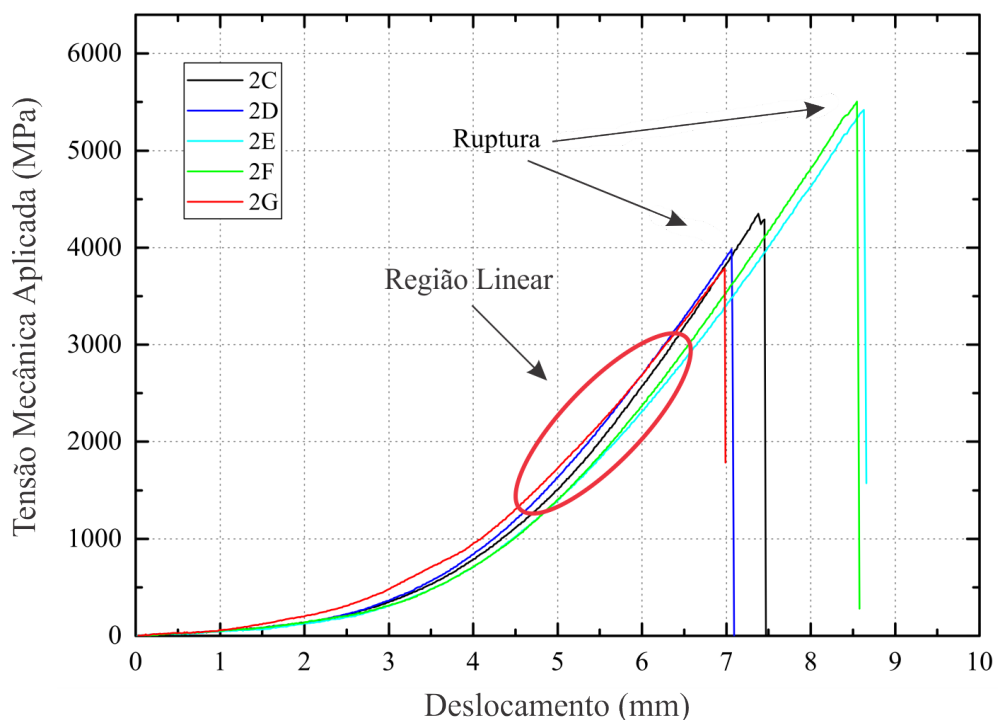
<sup>1</sup> Agradecimento especial ao Sr. Leonides e Sra. Luciana do TECPAR, Centro de Tecnologia de Materiais, pela cessão de uso do Laboratório de Madeiras e ajuda nos ensaios físicos e estatísticos de levantamento de módulo de elasticidade do compósito de fibra de carbono.

Na Figura 38(b) a máquina de tração do fabricante *Kratos* e na Figura 38(c) os CPs pós ensaio de tração, todos rompidos. Foram ensaiados pelo menos cinco CPs de cada espessura, com 2, 4, 6 e 8 camadas de compósito de fibra de carbono.

Os resultados dos ensaios são apresentados na Figura 39. Pela característica das curvas, o material é caracterizado como elástico, justamente por não ocorrer a região plástica na curva, ponto em que a deformação do material se torna permanente, conforme detalham (FARINA, 2009; CORREIA, 2017). Em todos os CPs e em qualquer quantidade de camadas houve a ruptura sem deformação permanente ou plástica. Na Figura 39 é possível identificar os pontos de ruptura de cada CP, além da região linear definida entre os pontos de 4,5 até 6,5 mm de deslocamento por tração da fibra de carbono. Por essa região pode-se determinar o módulo de elasticidade do material, e que nada mais é do que a declividade da curva pelo segmento de reta destacado. Por esse comportamento linear nessa parte da curva, pode-se dizer que a tensão é proporcional a deformação, de acordo com (NUSSENZVEIG, 2018).

A nomenclatura utilizada para identificação dos CPs foi a seguinte: número 'X' de camadas do CP e a letra corresponde ao nome da amostra, p.ex.: duas camadas 2A, 2B, 2C, ..., 2F, com quatro camadas, 4A, 4B, 4C, ..., 4F, com seis camadas, 6A, 6B, 6C, ..., 6F e assim sucessivamente foram nomeadas cada uma das amostras ou corpos de prova.

**Figura 39 – Ensaio de tração mecânica. Curva de estiramento de corpos de prova até o ponto de ruptura**



**Fonte: Autoria própria**

Para os ensaios de tração nos CPs de duas camadas, cinco amostras foram utilizadas (2C, 2D, 2E, 2F e 2G), as duas primeiras amostras (2A e 2B) foram utilizadas para calibração da máquina de tração. Ensaios com 4, 6 e 8 camadas tiveram a mesma metodologia e calibração da máquina. As forças mínimas 4,14 kN, média 4,96 kN e máxima 6,02 kN são verificadas pelos pontos de ruptura/fratura das amostras, respectivamente em 7 mm, 7,45 mm e 8,7 mm de deslocamento, apresentado na Figura 39. Nesse conjunto de amostras o módulo de elasticidade  $E$  longitudinal no sentido do tecido da fibra apresentou média de 3,85 GPa ou kN/mm<sup>2</sup>.

Na Tabela 9 são apresentados os valores obtidos em todos os ensaios de tração. A média da força máxima aplicada em cada conjunto de amostras até o seu ponto de ruptura é apresentado em Newtons (N). Percebe-se na Tabela 9, em valores aproximados, a grandeza de 5 kN como sendo o valor característico de ruptura para cada conjunto de duas camadas de compósito de fibra de carbono. Esse valor característico de 5 kN se justifica pela média de valores encontrados no ensaios para quatro camadas aproximadamente, 11 kN, para seis camadas 14,6 kN e para oito camadas de compósito, 20,6 kN. Na Tabela 9, o módulo de elasticidade é apresentado com uma variação de aproximadamente 2 GPa (faixa de 2,15 a 4,15 GPa). Essa variação é encontrada na literatura de 2 a 7 GPa. Os autores (QUANG *et al.*, 2016) apresentam valores para o módulo de elasticidade no sentido longitudinal na ordem de 2,67 GPa. A média geral de todas as amostras de 2 a 8 camadas de compósito foi de 3,26 GPa.

**Tabela 9 – Valores médios produzidos no ensaio longitudinal de tração mecânica.**

	<b>Força Máxima de Ruptura (kN)</b>	<b>Módulo de Elasticidade (GPa)</b>	<b>Área da Seção Transversal (mm<sup>2</sup>)</b>
CP 2 camadas	4,96	3,85	12,02
CP 4 camadas	11,06	4,16	21,62
CP 6 camadas	14,57	2,86	41,43
CP 8 camadas	20,67	2,15	65,21

**Fonte: Autoria própria.**

Há uma explicação necessária, para comprovar as diferenças de valores encontrados, principalmente no módulo de elasticidade. Cada amostra foi produzida de forma manual, e pode acarretar variações na concepção final do produto. Mesmo realizando todos os passos com a mesma metodologia, a experiência ou não do operador pode gerar peças diferentes, podendo ser afetadas por:

- Excesso ou falta de epóxi;

- Erro de proporção entre materiais A:B da resina;
- Pressão no espalhamento da resina epóxi de forma desordenada;
- Bolhas de ar;
- Áreas do tecido com falhas na trama;
- Desalinhamento no recorte do tecido;
- Pouco tempo de cura da resina pode provocar falha na estrutura ou endurecimento precoce na cola, dificultando espalhamento sobre o tecido.

Por esses motivos, o processo de fabricação de peças em CFRP deve ter um controle bem rígido de etapas. Se cada etapa for concluída corretamente, mesmo assim incertezas podem ocorrer. Entretanto, a experiência do operador pode reduzir qualquer tipo de erro grosseiro, ficando apenas erros aceitáveis do processo. Automatizar algumas etapas melhora consideravelmente o resultado final das peças, homogeneidade, acabamento, precisão de corte.

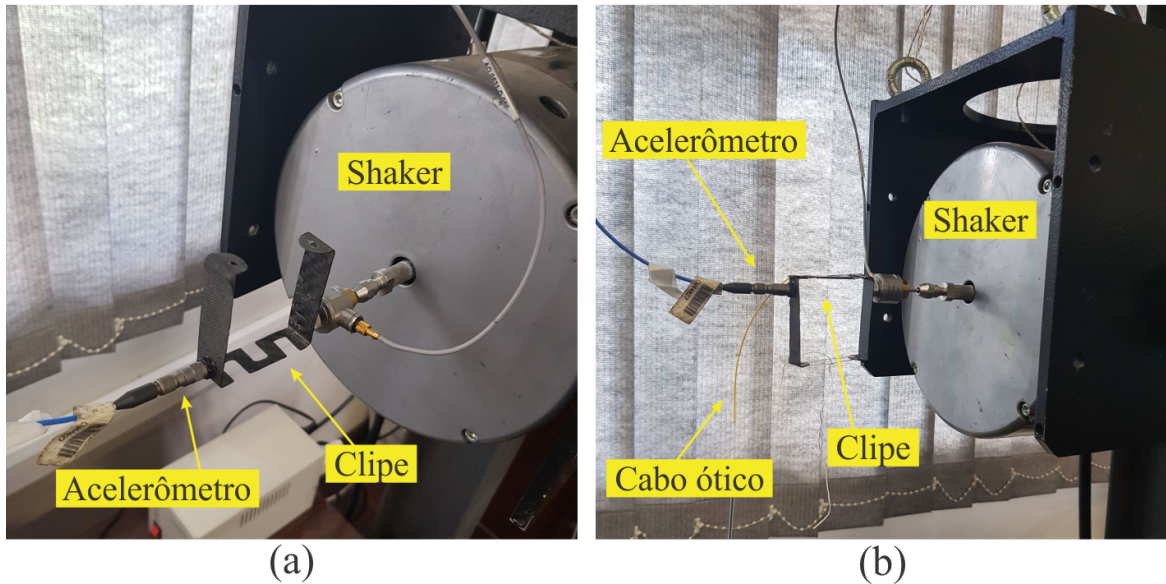
#### 4.2 RESPOSTA EM FREQUÊNCIA HARMÔNICA DO CLIPE

Na Seção 3.3 foi apresentado um estudo sobre formato e dimensões do clipe de engate rápido, em especial sobre a face onde os sensores são posicionados. A escolha da dimensão de espessura de 1 mm favorece a aplicação desejada para os parâmetros do transformador utilizado em todos os experimentos e visto na Seção 3.2. É importante ressaltar que a resposta em frequência do clipe e suas frequências naturais não coincidem com os sinais de frequência elétrica ou mecânica características desse tipo de equipamento, que são a frequência fundamental em 60 Hz, e seus respectivos harmônicos, 120, 180, 240 Hz e superiores, justamente para não haja nenhuma leitura conflitante entre a resposta em frequência do clipe e resposta em frequência dos sensores FBGs.

Três métodos foram utilizados para determinar a resposta em frequência harmônica do clipe e identificar a viabilidade de aplicação diretamente no núcleo, conhecendo quais são suas frequências naturais e se elas não interferirão na leitura de deformação. A Figura 40 apresenta o ensaio experimental realizado junto ao Laboratório de Vibração e Som (LAVIBS) do Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica (PGMec) da Universidade Federal do Paraná (UFPR), que cedeu sua infra-estrutura. A Figura 40(a) mostra a forma de acoplamento

do clipe ao equipamento de varredura da frequência *shaker* e também ao acelerômetro. Na Figura 40(b) o clipe já com o sensor FBG de deformação encapsulado em sua estrutura.

**Figura 40 – Realização de ensaio experimental Laboratório de Vibração e Som (LAVIBS-UFPR). (a) Acoplamento do clipe de CFRP ao *shaker* (b) Atuadores posicionados, *shaker*, acelerômetro e sensor FBG de deformação.**



Fonte: Autoria própria

O primeiro teste realizado foi a simulação em elementos finitos, com seus respectivos dados apresentados na Tabela 7, que mostra as deformações sofridas por diferentes geometrias e características da resposta harmônica e seus respectivos modos vibracionais. Essa resposta harmônica é apresentada na Figura 41(a) com dois picos destacados pelas respectivas frequências naturais, 95 e 239 Hz, numa faixa de frequência de 0 a 330 Hz, que é a faixa onde são destacados os principais modos vibracionais do clipe com espessuras de 1 mm a 2 mm, como já apontava a simulação FEM vista na Figura 34, com a ressalva que aquela simulação foi realizada com a geometria do clipe inteiro. O segundo método realizado é denominado de caracterização dinâmica, onde o equipamento de teste do martelo de impacto é do modelo 086C04 e acelerômetro piezoelétrico do modelo 352C68, ambos fabricados pela PCB-Piezoetrics®. A placa aquisitora do sinal do sensor elétrico é Photon II, do fabricante LDS DRACTION®, e analisado com o software RT Pro Photon. Como o martelo de impacto insere-se uma força externa ao clipe no mesmo ponto de incidência da força destacada na FEM da Figura 33(a) e por meio do acelerômetro verifica-se a resposta em frequência harmônica do clipe. Na Figura 41(b) percebe-se os mesmos picos de frequência da peça, em 98,9 e 239,9 Hz, valores próximos com o simulado em elementos finitos. Para ambos os ensaios em FEM e martelo de impacto a resposta de vibração por excitação harmônica é dada pela aceleração do sistema ou pela função de transferência

denominada Inertância. A equação do movimento de um sistema massa-mola-amortecedor com 1 grau de liberdade com uma força de excitação  $F(t)$  agindo sobre ele descreve esse efeito de aceleração e é mostrada pela Equação 14 (RAO, 2008):

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = F(t). \quad (14)$$

Assumindo que a força  $F(t)$  é do tipo harmônica e descrita pela Equação 15:

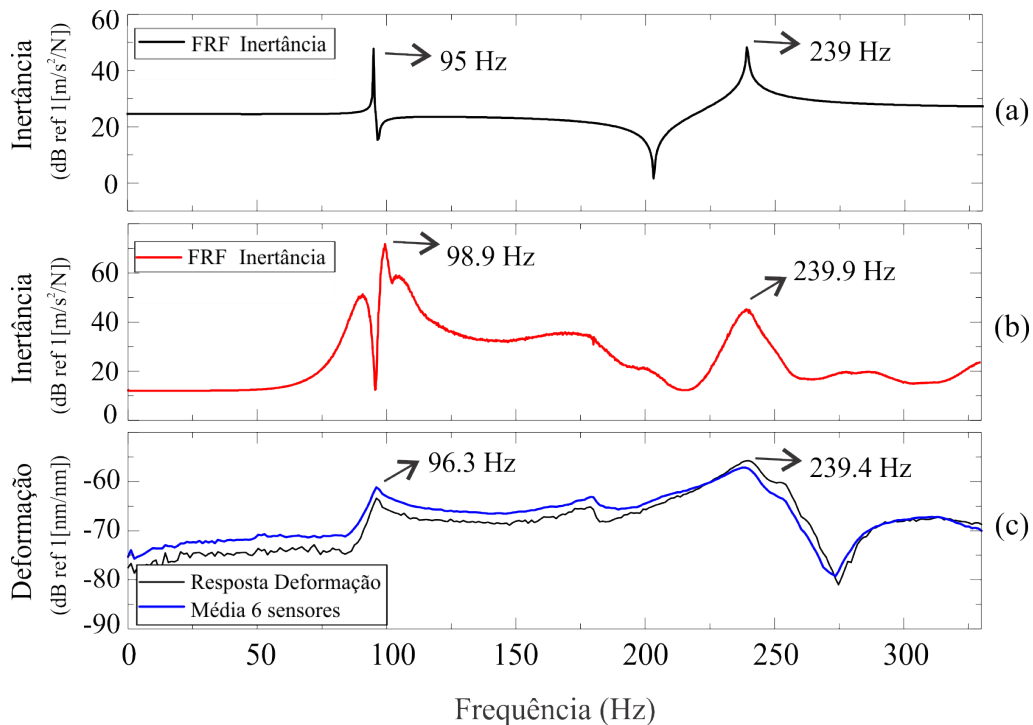
$$F(t) = F \text{sen}(\omega t), \quad (15)$$

sendo  $F$  a amplitude de excitação, de unidade [N], e  $\omega$  é a frequência de excitação, então substituindo na equação do movimento, tem-se a Equação 16:

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = F \text{sen}(\omega t) \quad (16)$$

Portanto, sabendo que o movimento é harmônico e conhecendo a força  $F$  aplicada, é possível determinar a aceleração do sistema, apresentados pela Figura 34.

**Figura 41 – Resposta harmônica do clipe. (a) resposta em FEM, em (b) resposta do martelo de impacto e (c) resposta do sensor óptico embarcado**



**Fonte: Autoria própria**

No terceiro método experimental, que é basicamente idêntico ao segundo ensaio, com a diferença de que o elemento sensor é a FBG de deformação ao invés do acelerômetro. Nesse ensaio, por meio do mesmo impacto do martelo, obtêm-se o sinal de resposta em frequência



do clipe. Esse resultado está sendo apresentado na Figura 41(c) e seus respectivos valores de picos em 96,3 e 239,4 Hz. A Figura 41(c) ainda mostra uma média de 6 ensaios realizados com a mesma metodologia. A maior variação percentual foi de 4,1 % para o primeiro pico e 0,38 % para o segundo pico de frequência natural do clipe. A variação do sinal óptico medida pelo sensor FBG obteve resposta com picos de valores entre os dois primeiros métodos da Figura 41(a) e (b). Quando se compara esses resultados é possível dizer que as dimensões e o formato do clipe são fatores relevantes para a determinação da faixa de leitura desejada dos sensores FBGs. Alterando parâmetros como a espessura torna o clipe mais rígido ou mais flexível, conseguindo dessa maneira, deslocar os picos de frequências naturais para regiões desejadas. Assim, garante-se trabalhar em regiões lineares da curva de resposta em frequência do clipe.

#### 4.3 ENSAIO DE DEFORMAÇÃO DO NÚCLEO DO TRANSFORMADOR

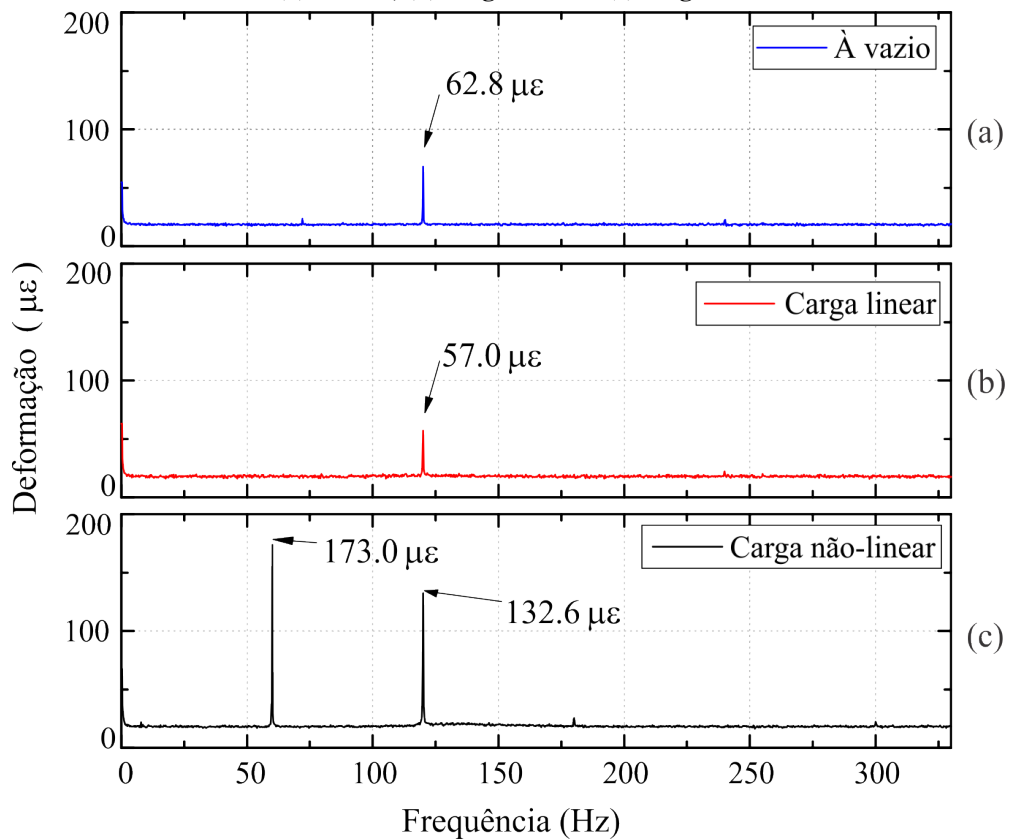
A simulação em elementos finitos que apresentou os modos vibracionais e geometria ao clipe foi visto na seção 3.3.1 e, além disso, mostrou o comportamento harmônico da estrutura de CFRP e como ele responde quanto a deformação máxima ( $54 \mu\text{m}$ ) no ponto central da peça, local de posicionamento do sensor FBG. Essa seção apresentará um comparativo da simulação FEM e os resultados experimentais do sensor FBG de deformação, mediante a inserção de cargas lineares e não-lineares ao transformador.

Os ensaios experimentais no transformador medindo a deformação do seu núcleo sob condições de carga linear e não-linear são apresentados na Figura 42. A simulação FEM tomou como referência a resposta com carga linear, e obteve valor de  $54 \mu\text{m}$  de deformação máxima na face dos sensores FBGs, apresentado no capítulo anterior na Figura 33(b).

Na situação com terminais em aberto no secundário, à vazio, o núcleo deformou  $62,8 \mu\text{E}$ , na frequência de 120 Hz e foi 14,4 % superior ao padrão da simulação, observado na Figura 42(a). Com carga puramente resistiva (linear), a componente fundamental 120 Hz de vibração é vista, deformando o sensor FBG com uma amplitude de  $57,0 \mu\text{E}$ , como mostrado na Figura 42(b). Essa condição é 3,8 % maior que o padrão simulado. Com carga não-linear aparecem duas componentes de frequência, uma em 60 Hz e outra em 120 Hz, com amplitudes aproximadas de 2 a 3 vezes maior,  $173,0 \mu\text{E}$  e  $132,6 \mu\text{E}$ , respectivamente, visto na Figura 42(c).

A componente fundamental mecânica de frequência 120 Hz aparece em todas as condições de carga no transformador, Figura 42 (a), (b) e (c). Entretanto, sob condição de carga não linear há o surgimento de uma corrente pulsada, logo, essa característica não senoidal leva

**Figura 42 – Ensaio experimental de deformação. Resposta em frequência com transformador (a) à vazio, (b) carga linear e (c) carga não-linear**



Fonte: Autoria própria

a vibrações no núcleo do transformador, bem como novas componentes de frequência, vistas em 60 Hz. A amplitude dessas componentes de 60 e 120 Hz é incrementada por esse aumento de vibração. Os valores são 173 e 132,6  $\mu\epsilon$ , respectivamente. Em 120 Hz, se comparada com a resposta à vazio ou carga linear, pode afirmar que a vibração foi duas vezes maior, potencializando futuros problemas mecânicos. A resposta em frequência do clipe em carga não-linear é mostrada pela Figura 42(c). Em algumas situações de carga elétrica, harmônicos de frequência em 180 e 240 Hz aparecem mas com amplitude baixa.

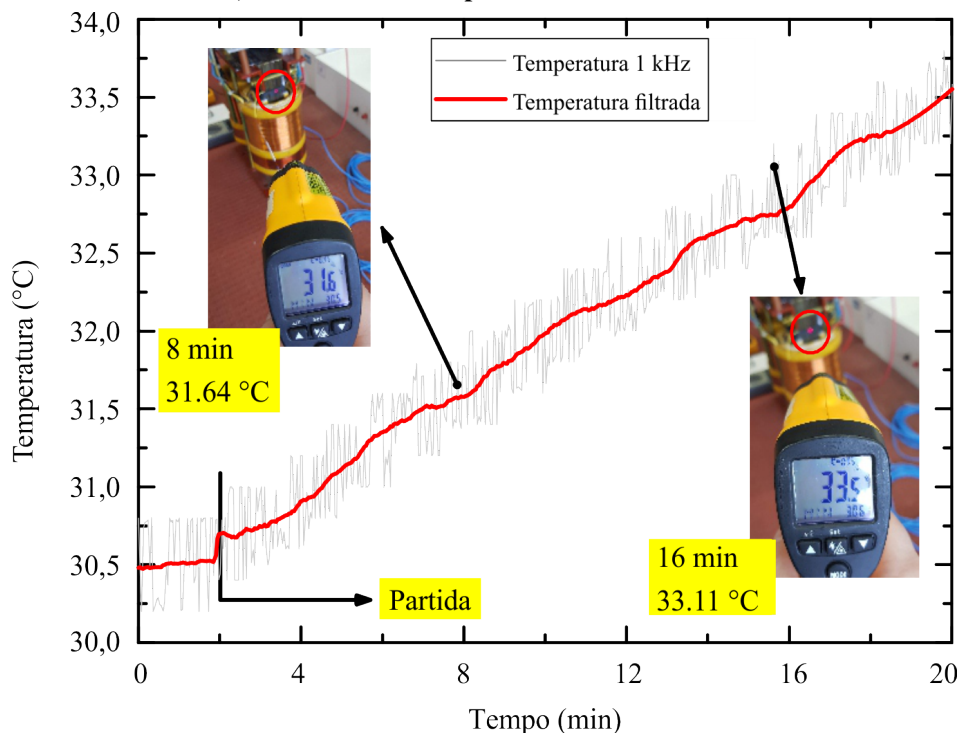
#### 4.4 ENSAIO TÉRMICO NO TRANSFORMADOR

Nos ensaios experimentais também foram medidas temperaturas diretamente com os sensores FBG no núcleo de ferro do transformador. Esses ensaios levaram em consideração as condições de cargas não-lineares, visto que é o ensaio que provoca condições mais severas de vibração, também é o que confere maior elevação de temperatura devido ao aumento nas perdas no transformador.

Esse ensaio é importante para garantir a compensação de temperatura e eliminar a sensibilidade cruzada que há entre as medições de deformação e temperatura nos sensores FBGs. A temperatura foi medida concomitantemente com a deformação, pelo sensor encapsulado no clipe de CFRP. Associada a medição de temperatura pelo sensor óptico, um pirômetro óptico a laser foi usado para comparação, da marca *HOMES/425K*. As medições desse equipamento complementam os resultados do sensor FBG, mas é importante destacar que as medidas do pirômetro são externas ao clipe de fibra de carbono. Além disso, essa medição específica de temperatura, não visa conhecer os limites de operação de temperatura do transformador, mas sobretudo, mostrar a confiabilidade dos resultados dos sensores FBGs, comparando com um equipamento comercial com boa exatidão, conforme dados da Equação 17.

A Figura 43 apresenta as características de temperatura tanto do sensor FBG, quanto do pirômetro. Pontos relevantes do gráfico são destacados, como: em dois minutos o transformador é ligado e partindo com carga não-linear no secundário.

**Figura 43 – Ensaio experimental de temperatura, dois pontos de interesse em 8 e 16 min, leitura do sensor e pirômetro laser**



Fonte: Autoria própria

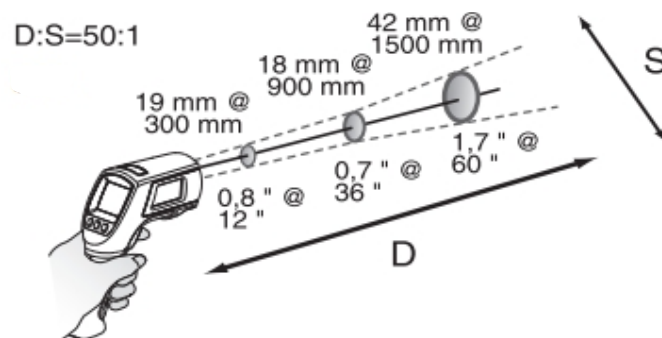
Em oito minutos um ponto de comparação, onde o sensor FBG está medindo 31,64 °C e o leitor laser, 31,6 °C. Um erro de aproximadamente +0,13 %. Em 16 min, outra medição, com sensor FBG a 33,11 °C e leitor laser 33,5 °C, erro de -1,16 %. Na Figura 43 ainda é observada a

temperatura do sensor FBG com uma taxa de aquisição de sinal de 1 kHz, e a aplicação de um filtro passa-baixa para redução do ruído de leitura do sinal.

Sobre o pirômetro infravermelho (IR) a laser, o fabricante Fluke comenta sobre tipos de superfície de medição, e no caso a superfície medida é opaca e preta, característica do compósito em fibra de carbono, não houve problemas de leitura. A medição foi realizada a aproximadamente 1 m de distância e o ponto focal a 20 mm. À medida que a distância (D) ao objeto medido aumenta, o tamanho do ponto (S) da área medida também aumenta. A relação entre distância e ponto focal (D: S) é mostrada na Figura 44. De acordo com o fabricante do pirômetro, os tamanhos dos pontos correspondem a 90 % da energia circundante. Além disso, o comprimento do sensor é de 3 mm, sendo que o ponto focal é de 20 mm, englobando completamente o sensor. A precisão do pirômetro é variável, conforme Equação 17:

$$\left\{ \begin{array}{l} < 0\text{ }^{\circ}\text{C} : \pm(1,0\text{ }^{\circ}\text{C} + 0,1\text{ }^{\circ}\text{C}/1\text{ }^{\circ}\text{C}) \\ > 0\text{ }^{\circ}\text{C} : \pm 1\% \text{ ou } 1\text{ }^{\circ}\text{C}, \text{ o que for maior} \end{array} \right. \quad (17)$$

**Figura 44 – Dados do fabricante *Fluke* sobre a distância focal de medição de temperatura de objetos**



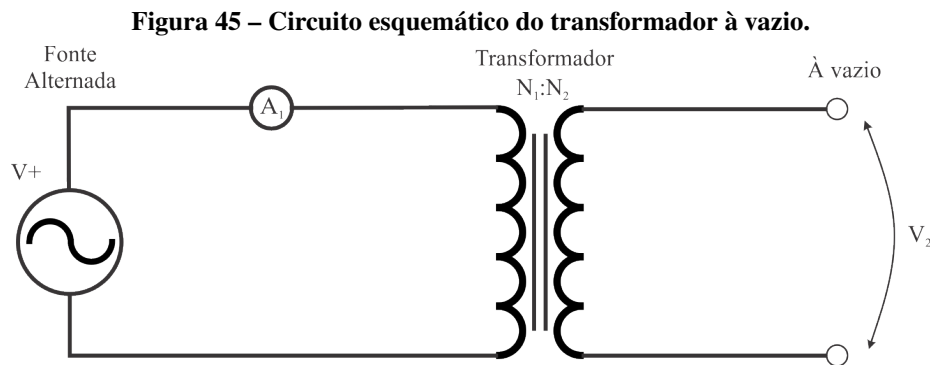
**Fonte: Retirado de catálogo de produtos do fabricante Fluke**

#### 4.5 RESPOSTA EM FREQUÊNCIA DE VIBRAÇÃO SOB VARIAÇÃO DE CARGA

Conhecer o perfil da resposta em frequência do transformador é fundamental para a identificação de falhas de forma antecipada. Por exemplo, se as propriedades mecânicas do transformador forem afetadas pela pressão de aperto ou pela rigidez do material de isolamento, o comportamento das frequências naturais do equipamento mudará completamente. Portanto, a detecção de falhas estruturais depende de alterações na própria resposta de frequência. Falhas

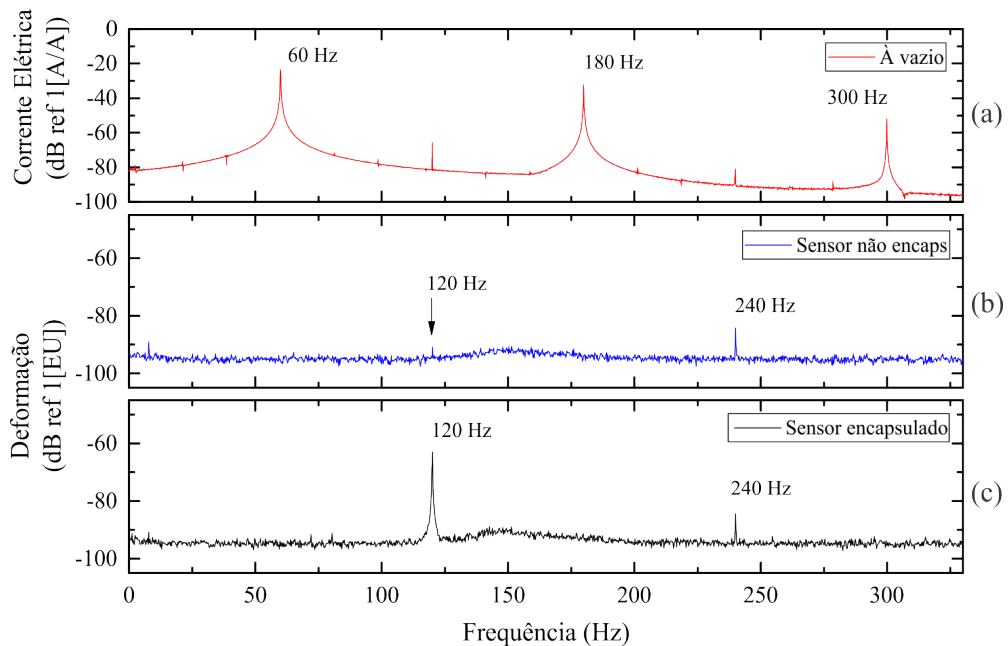
estruturais sempre causam distúrbios na resposta em frequência. Wang e Pan (2015) relatam que essas mudanças podem não ser tão óbvias quanto as que ocorrem nas frequências naturais de funcionamento da máquina.

Para os resultados apresentados a seguir enfatiza-se que a principal informação do sensor não é a intensidade do seu sinal, mas sim a sua capacidade de identificação de vibração na resposta em frequência do núcleo do transformador. Todos os ensaios elétricos tiveram a metodologia de submeter o transformador à vazio, com carga linear e não-linear apresentada na Seção 4.3. O circuito da Figura 45 apresenta a configuração elétrica sem carga. Além disso, um sensor de deformação com fibra nua, sem compensação de temperatura foi colado ao núcleo para promover uma base de comparação entre o resultado do sensor encapsulado e em fibra nua. Durante o primeiro teste elétrico, o transformador estava à vazio. Mesmo não havendo carga, uma corrente de magnetização está presente no circuito. A resposta em frequência da corrente elétrica é apresentada para identificar o comportamento elétrico da máquina. Esse comportamento é visto na Figura 46(a), onde percebe-se as frequências elétricas da componente fundamental 60 Hz e seus respectivos harmônicos em 180 Hz e 300 Hz, que são originados devido a natureza da própria rede elétrica e suas cargas indutivas e capacitivas.



Fonte: Autoria própria

**Figura 46 – Transformador submetido a carga à vazio. Em (a) corrente elétrica, (b) FRF de deformação do sensor óptico não encapsulado e (c) FRF de deformação do sensor óptico embarcado na fibra de carbono**



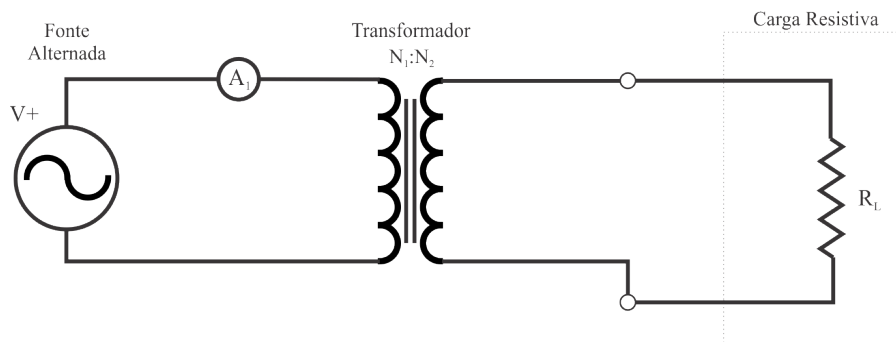
**Fonte: Autoria própria**

Na Figura 46(b) e (c) a FRF de deformação do núcleo de ferro laminado é apresentada. A resposta em frequência do sensor não-encapsulado é vista em (b), e demonstra a falta de sensibilidade mecânica do sensor óptico para essa aplicação. Nota-se dois picos de frequência, um fraco em 120 Hz é a componente fundamental mecânica e em 240 Hz, o primeiro harmônico. Para o sensor óptico encapsulado em CFRP e acoplado ao núcleo, visto em (c), a componente fundamental de frequência em 120 Hz é bem evidenciada, além do primeiro harmônico em 240 Hz. Há um aumento na sensibilidade na leitura do sinal de frequência do transformador. A amplitude do sinal em 120 Hz para o sensor embarcado é -62,9 dB enquanto que para o sensor não-encapsulado é de -90,7 dB. Portanto, comparadas com a linha de base do sinal que é definida em -95 dB, as relações são 4,7 % e 51 % para o sensor não-encapsulado e sensor embarcado, respectivamente.

O segundo ensaio elétrico foi aplicar ao transformador uma carga elétrica linear puramente resistiva no secundário. O esquemático elétrico da Figura 47 apresenta essa configuração. A Figura 48 mostra o comportamento da corrente elétrica e também de deformação do núcleo. Na Figura 48(a) é apresentada a corrente elétrica a 1/3 da corrente nominal (4,6 A), onde as componentes fundamental, de primeiro e de segundo harmônico elétrico estão representadas por 60, 180 e 300 Hz. Embora a natureza da carga seja resistiva, há um distúrbio provocado pela própria rede de alimentação do transformador que distorce o sinal de entrada e provoca

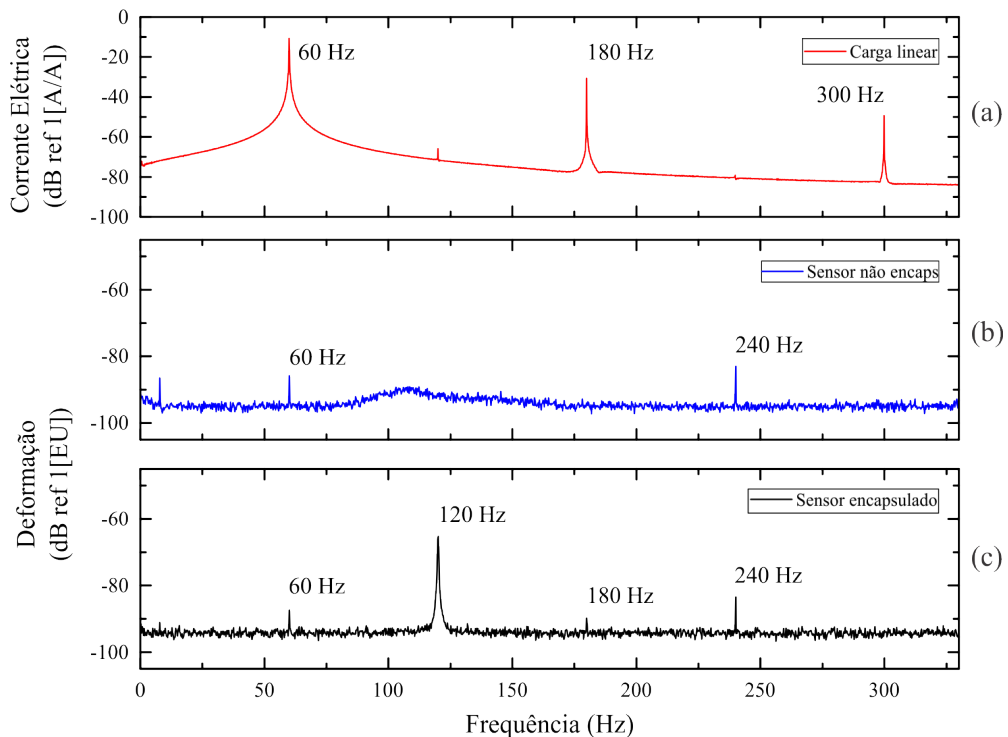
harmônicos em ordem superiores em sua saída. Outrossim, a diferença entre a componente de 60 Hz e a primeira harmônica em 180 Hz é -20 dB, ou seja, equivale a dizer que essa componente é 10 vezes menor do que o pico em 60 Hz, conforme a equação  $I_{dB} = 20 \log_{10}(I_{180Hz}/I_{60Hz})$ . Para a FBG não-encapsulada não houve sensibilização em 120 Hz e foi tomado o valor de referência de linha base em -95 dB como sendo o valor máximo de sua intensidade para essa frequência. Além disso, uma componente em 60 Hz está presente, diferentemente do ensaio à vazio que não apresentou essa componente.

**Figura 47 – Circuito esquemático do transformador submetido a carga puramente resistiva.**



Fonte: Autoria própria

**Figura 48 – Transformador submetido a carga linear puramente resistiva. Em (a) corrente elétrica (b) FRF de deformação do sensor óptico não encapsulado e (c) FRF de deformação do sensor óptico encapsulado na fibra de carbono**

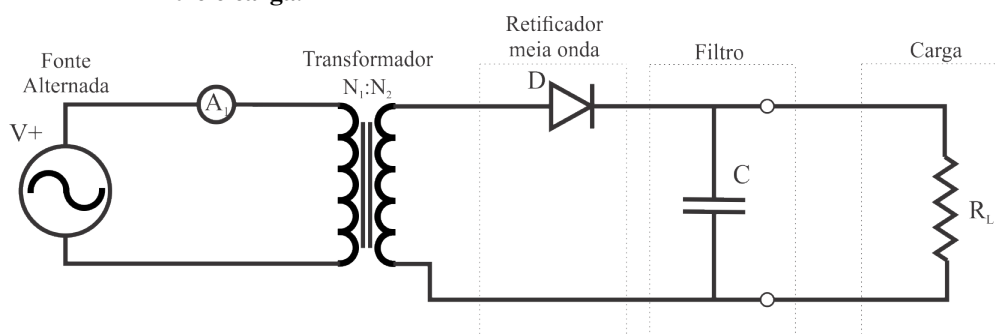


Fonte: Autoria própria

O sensor FBG colado ao núcleo, representa a Figura 48(b), e não apresentou a componente de frequência fundamental em 120 Hz. Apenas nas frequências de 60 e 240 Hz foram sensibilizadas, mas com pequena amplitude. O sensor encapsulado da Figura 48(c) obteve um pico -65 dB da componente fundamental mecânica em 120 Hz. Referenciado pela linha de base em -95 dB, houve um incremento de aproximadamente 30 dB. Como o sensor não encapsulado não foi sensibilizado, a diferença entre ambos foi de 1000 vezes. Além dessa componente fundamental, em 60 Hz surge uma componente, em que a diferença de leitura dos dois sensores FBGs é reduzida. O que ocorre também em 240 Hz, no primeiro harmônico mecânico a diferença igualmente é baixa. Na condição de carga linear, o transformador tem um comportamento linear com poucas vibrações mecânicas sendo geradas e quase nenhuma fora da normalidade teórica.

O terceiro e último ensaio elétrico, foi provocar ao transformador um desbalanceamento, ou seja, submetê-lo a cargas não-lineares. Esse ensaio experimental é o mais próximo do funcionamento real que um transformador pode operar, por exemplo, como se estivesse ligado a rede e operando com cargas industriais, inversores, máquinas elétricas. O desbalanceamento foi provocado usando um circuito RC e um retificador de meia-onda. O modelo deste circuito foi escolhido apenas por provocar uma corrente pulsada e consequentemente um desbalanceamento ao transformador. Os valores nominais dos componentes são:  $R = 48,4 \Omega$ ,  $C = 35 \mu\text{F}$  e diodo 10 A/250 V, a carga total aplicada foi de 1 kVA e corrente aproximada de 4,6 A. O circuito pode ser visto na Figura 49.

**Figura 49 – Circuito elétrico do transformador ligado a um retificador de meia-onda, filtro e carga.**



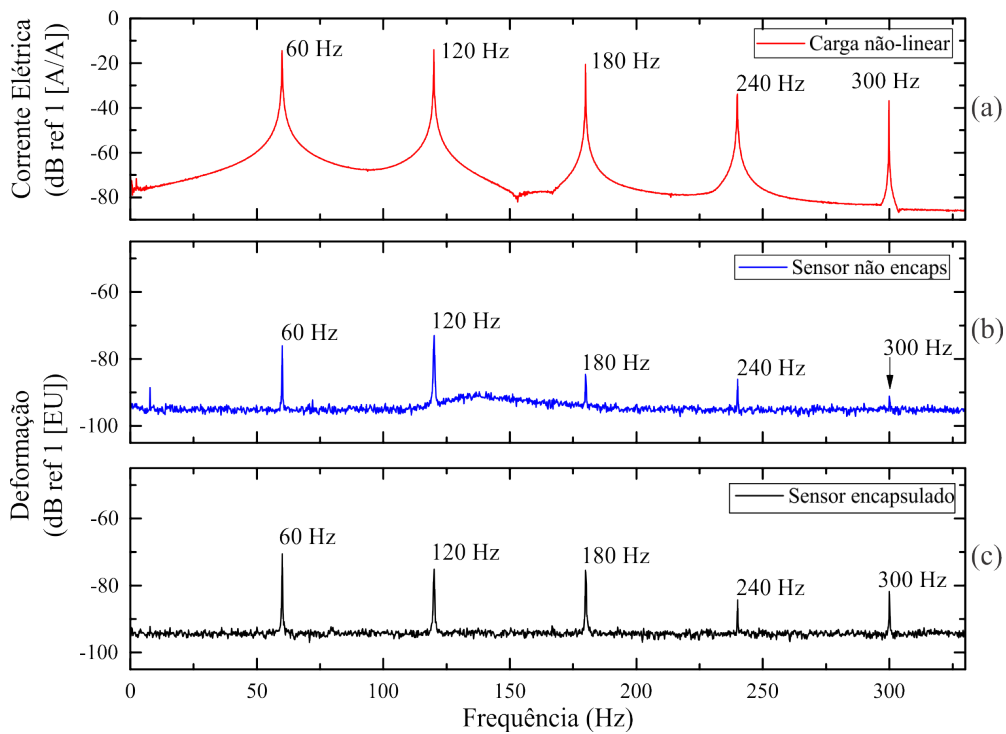
Fonte: Autoria própria

A corrente elétrica é apresentada na Figura 50(a), e mostra a componente fundamental em 60 Hz e suas harmônicas em 120, 180, 240 e 300 Hz. Nota-se um aumento na taxa de distorção harmônica da corrente elétrica. Então, devido à natureza carga RC e retificador de meia onda, a corrente é pulsada, deixando de ser senoidal. Há o aparecimento de componentes em frequência de amplitudes elevadas e consequentemente mais vibração ao transformador.



Nestes ensaios, o sensor FBG de deformação encapsulado obteve resultados mais lineares e com boa relação sinal-ruído do que o sensor não-encapsulado, identificando todas as frequências esperadas, na faixa de 0 até 300 Hz.

**Figura 50 – Transformador submetido a carga não-linear RC. Em (a) corrente elétrica, (b) a FRF de deformação do sensor óptico não encapsulado e em (c) a FRF de deformação do sensor óptico embarcado na fibra de carbono.**



Fonte: Autoria própria

No ensaio de cargas não lineares, há uma aproximação de respostas de ambos os sensores, mas nota-se que o sensor FBG encapsulado tem resultados com melhor sensibilidade em todas as frequências identificadas, apenas em 120 Hz houve um decréscimo de -2,9 dB. Nas demais frequências, 60, 180, 240, e 300 Hz houveram acréscimos de 5,1 dB, 9,3 dB, 2,1 dB e 9,2 dB respectivamente.

A Tabela 10 resume cada frequência identificada, numa faixa de 0 até 250 Hz, pelos sensores FBGs de deformação colado livre e encapsulado em CFRP e suas respectivas variações sob três condições de cargas elétricas. O melhor desempenho aconteceu para a componente fundamental em 120 Hz, com -62,9 dB, 64,4 dB e 75,1 dB em carga à vazio, linear e não-linear, respectivamente. À vazio a diferença foi de 27,8 dB e com carga linear alcançou 28,5 dB de desempenho se comparado com o sensor colado livremente no núcleo do transformador. Com carga não-linear obteve um desempenho um pouco abaixo, se comparado com o sensor colado, apenas -2,97 %, entretanto o valor do pico foi de -75,1 dB, considerado uma boa sensibilidade.

**Tabela 10 – Intensidade da frequência sob diferentes condições de cargas elétricas**

		À vazio	Variação*	Carga Linear	Variação	Carga não-linear	Variação	
		(dB)	(dB)	(dB)	(dB)	(dB)	(dB)	
Frequência (Hz)	60	U <sup>1</sup>	N/R <sup>3</sup>	-85.2		-75.2		
		E <sup>2</sup>	N/R	-87.3	-2,1	-70.1	5,1	
	120	U	-90.7	27,8	-92,9	28,5	-72.2	-2,9
		E	-62.9		-64.4		-75.1	
	180	U	N/R	0	-94,6	5,88	-84.8	9,3
		E	N/R		-88.8		-75.5	
	240	U	-84.2	-0,3	-83.1	-0,3	-85.9	2,1
		E	-84.5		-83.4		-83.8	

U<sup>1</sup> - Sensor de deformação não-encapsulado.

E<sup>2</sup> - Sensor de deformação encapsulado no CFRP.

N/R<sup>3</sup> - Sem leitura do sensor.

Variação\* positiva, sensor encapsulado (E) com maior amplitude.

**Fonte: Autoria própria.**

No geral, o sensor encapsulado em compósito de fibra de carbono mostrou uma forma rápida de fixação dos sensores FBGs ao núcleo de transformador, o que normalmente por métodos tradicionais de colagem é um avanço significativo, pois com o clipe, esse tempo de fixação é de apenas alguns segundos para acoplá-lo ao núcleo do transformador. Além disso, essa metodologia de medição diretamente no núcleo, é diferente e promissora frente aos sensores tradicionais *strain gages* utilizados comercialmente, mas que são fixados na carcaça externa do equipamento.

## 5 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Neste capítulo serão apresentadas as conclusões desta tese que foi baseada na criação de um novo dispositivo de engate rápido de posicionamento direto no núcleo de transformadores. O dispositivo usa sensores FBGs multiparamétrico de temperatura e vibração. Os sensores são encapsulado em fibra de carbono que melhoram a sensibilidade do sensor ótico. Também são apresentadas as perspectivas de trabalhos futuros para a continuidade dos estudos para monitoramento de identificação de falhas em transformadores de distribuição e potência.

### 5.1 CONCLUSÕES

O uso de um dispositivo fabricado em compósito de fibra de carbono, com sensores FBGs encapsulados, mostrou-se adequado às medições de deformação e temperatura diretamente no núcleo de um transformador de 3 kVA, sendo este, o propósito geral deste trabalho.

O processo criativo de projetar uma peça que pudesse ser acoplada firmemente ao núcleo do transformador e transferir as vibrações mecânicas aos sensores foi desafiador para o autor. O estudo inerente a escolha de um material que pudesse ser acoplado a diferentes tipos de núcleo e também com características isolantes foi muito importante para a sequência do projeto. Essas razões levaram a definição e escolha do compósito reforçado em fibra de carbono. Esse polímero tem densidade elevada  $1.490 \text{ Kg/m}^{-3}$ , um coeficiente de expansão térmica baixíssimo  $-4,7 \times 10^{-7} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ , dessa forma, o material não influencia na leitura do sensor térmico. Também muito importante é o módulo de Young ou módulo de elasticidade do material, com valores de literatura de 8.600 MPa nas direções YZ e dados experimentais médios de 4.000 MPa conduzidos em ensaios de ruptura com corpos de prova em máquina de tração. As diferenças encontradas são plenamente compreensíveis devido ao tipo de corte (manual) realizado nos corpos de prova, mas não influenciaram em nada o desempenho mecânico dos ensaios dinâmicos e elétricos. Igualmente, houve uma linearidade da força de ruptura a cada par de camadas incorporadas aos corpos de prova, aproximadamente 5 kN.

Conhecido o material e todas as suas características, a etapa de simulação em elementos finitos foi importantíssima para a definição do formato geométrico da peça, além de economizar um tempo valioso, visto que a fabricação de compósitos demanda uma série de fases morosas, aproximadamente uma semana entre: corte do tecido, impregnação em epóxi, moldagem, se-

cagem e cura, desmoldagem, usinagem, acabamento, colagem dos sensores, cura da cola dos sensores, e repete-se todas as fases anteriores para a camada externa de acabamento. A partir da simulação em FEM pode-se conhecer os modos de vibracionais, os pontos de deformação máxima da peça, e principalmente as frequências naturais do sistema. Dessa maneira, foi possível determinar o posicionamento de cada sensor, de deformação e temperatura, no corpo da estrutura projetada em formato de clipe. Sobretudo, pode-se projetar a frequência mecânica em uma faixa linear de trabalho para o sensor de deformação. A variação na espessura do clipe se mostrou o elemento mais adequado para variar essa faixa linear de frequência, 0 a 500 Hz, para medições de vibração do núcleo de ferro do transformador.

Três métodos foram utilizados para determinar a resposta em frequência do clipe. O primeiro, uma simulação em elementos finitos, com uma resposta harmônica de picos 95 e 239 Hz. O segundo, um ensaio mecânico experimental usando martelo de impacto, em que se obteve resposta em frequência com componentes em 98,9 e 239,9 Hz. O terceiro, foi um ensaio mecânico que mostrou a resposta dos sensores ópticos encapsulados no compósito e uma resposta em frequência com picos em 96,3 e 239,4 Hz. Comparando os resultados dos sensores ópticos com os dois primeiros ensaios, a variação percentual para ambas as componentes foram de: óptico/FEM para 96,3 Hz -1,35 % e para 239,4 Hz -0,17 % e óptico/martelo para 96,3 Hz 2,7 % e para 239,4 Hz 0,21 %.

Ensaio experimentais de vibração do núcleo sob condições de carga linear mostram uniformidade comparando com os resultados de simulação. Enquanto a simulação apontava 54,9  $\mu\text{m}$  para deformação máxima, o resultado experimental mostrou 57  $\mu\text{m}$  em condição de carga linear. Essa diferença foi de aproximadamente 3,8 % de variação. Sob condição à vazio, o transformador não está submetido a grandes esforços e funcionou de maneira semelhante a carga puramente resistiva. Já os ensaios a plena carga não-linear, há o aparecimento de harmônicos na corrente elétrica, devido a natureza da carga, e o núcleo de transformador vibra de maneira mais intensa, sendo visível a componente fundamental e componente harmônico mecânico. Em 60 Hz um valor de 173  $\mu\text{m}$  e em 120 Hz a deformação de 132,6  $\mu\text{m}$ , o dobro de deformação para os dois casos anteriores. Essa última situação é a mais semelhante a carga da rede elétrica, o que de certa forma potencializa condições de problemas mecânicos, como falha nas isolações do transformador.

Os ensaios de calibração térmica, realizados em banho térmico definiram a sensibilidade à temperatura de 9,83  $\text{pm}/^\circ\text{C}$  e um coeficiente de correlação de 0,9999. Os ensaios experimentais

de temperatura do núcleo do transformador foram realizados utilizando sensor FBG encapsulado e pirômetro óptico a laser. Os resultados mostraram variações em uma faixa de -1,16 % a 0,13 % entre cada instrumento de medição. Esses resultados foram obtidos em uma condição de carga não-linear, pois nessa condição o núcleo apresentou maior atividade vibratória, resultando em temperaturas mais elevadas do que em situações à vazio ou carga linear resistiva. Além disso, o sinal térmico foi utilizado para a compensação de temperatura em relação ao sensor de deformação.

Na sequência, um dos principais resultados considerados nesse trabalho, que são os dados de deformação do núcleo de ferro do transformador, sob condições de cargas elétricas diferentes. Os resultados levam em consideração a corrente elétrica do transformador e a comparação entre um sensor colado transversalmente ao núcleo em fibra óptica nua e o sensor proposto encapsulado em fibra de carbono com aumento de sensibilidade. Com o transformador operando à vazio, foi medida a corrente no primário do transformador e secundário em aberto, o resultado deve ter componentes de frequência fundamental em 60 Hz e harmônicos em 180, 300 Hz, devido a natureza de carga da rede elétrica. As componentes mecânicas em frequência são a fundamental 120 Hz e harmônicos 240 Hz e superiores de menor intensidade ou nulas. Ambos os sensores leram essas componentes mecânicas, entretanto o sensor encapsulado melhorou a leitura em aproximadamente 800 vezes ou 27,8 dB, para 120 Hz.

Em carga linear puramente resistiva, situação em que o transformador opera de maneira mais estável, com pouco ruído e pouca vibração. A FBG não encapsulada não foi sensibilizada para a componente fundamental mecânica em 120 Hz, por outro lado, a FBG embarcada apresentou uma intensidade de -64,4 dB em 120 Hz, tomando como referência a linha base de -95 dB, houve um acréscimo de 28,5 dB ou uma melhoria de 865 vezes.

Na última condição verificada, o transformador foi submetido a carga não-linear. Essa condição é a mais semelhante à carga da rede elétrica em funcionamento normal cotidiano. Foi criado um desbalanceamento na corrente, devido a natureza RC da carga, além de um retificador de meia-onda. A corrente elétrica pulsada produziu componente fundamental de 60 Hz, mas também harmônicos em 120, 180, 240, 300 Hz e superiores. Esses harmônicos elétricos foram todos replicados em vibração do núcleo. Ambos os sensores FBGs, não encapsulado e encapsulado identificaram todas as frequências, entretanto as componentes elétricas, 60, 180 e 300 Hz, o sensor encapsulado obteve melhor sensibilidade. Para as componentes mecânicas, em 120 e 240 Hz, ambos tiveram valores de pico semelhantes e com pouca variação. Entretanto,

realizando uma comparação dos picos de sensibilidade para cada tipo de sensor, não-encapsulado e dispositivo revestido, a relação média é de 3,4 dB. Ou seja, o sensor FBG revestido em material compósito tem o dobro de incremento de sensibilidade. Dessa forma, mostrou-se viável a aplicação direta no núcleo de ferro de transformadores monofásicos e trifásicos à seco.

No trabalho mostrou-se a capacidade de utilização de sensores ópticos em máquinas elétricas, a sua alta sensibilidade e imunidade eletromagnética, e principalmente se agregados a dispositivos em compósitos de fibra de carbono, pelas suas características físicas e mecânicas, de fácil moldagem e com inúmeras possibilidades de criação das mais variadas formas e geometrias. Isso dá a possibilidade de embarcá-los internamente às máquinas elétricas, transformadores, motores, geradores, linhas e torres de transmissão, onde os sensores elétricos convencionais de deformação e temperatura não se aplicam.

## 5.2 TRABALHOS FUTUROS

- Criação e desenvolvimento de um dispositivo em fibra de carbono com sensores de deformação encapsulados no compósito e que possam substituir uma ou mais placas de metal justapostas;
- Mapeamento térmico do transformador submetido a condições severas de operação, usando sensoriamento distribuído de temperatura (DTS);
- Realização de estudo dos efeitos que o campo magnético provoca ou interfere na vibração e temperatura do núcleo e dos enrolamentos do transformador.
- Produzir artificialmente falhas de curto-circuito nos enrolamentos, desgastes de isolamento no núcleo e enrolamentos, variações de tensão (picos tensão), e dessa maneira, levantar as curvas de resposta em frequência de cada falha para criar um padrão de reconhecimento pelos sensores ópticos de deformação dinâmica e temperatura.

## REFERÊNCIAS

ABEYWICKRAMA, Nilanga; SERDYUK, Yuriy V; GUBANSKI, Stanislaw M. Effect of core magnetization on frequency response analysis (fra) of power transformers. **IEEE Transactions on Power delivery**, IEEE, v. 23, n. 3, p. 1432–1438, 2008.

AGOU, S *et al.* Increasing the reliability of online insulation condition assessment of mv-hv equipment. **Electricity Today**, v. 12, n. 6, p. 22–27, 2000.

ALLWOOD, Gary; WILD, Graham; HINCKLEY, Steven. Fiber bragg grating sensors for mainstream industrial processes. **Electronics**, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 6, n. 4, p. 92, 2017.

ANEEL. **Agência Nacional de Energia - Condições Gerais de Fornecimento de Energia Elétrica**. 2010. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2010414.pdf>.

ARVIND, Dhingra; KHUSHDEEP, Singh; DEEPAK, Kumar. Condition monitoring of power transformer: A review. *In*: IEEE. **2008 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition**. [S.l.], 2008. p. 1–6.

BAGHERI, M; PHUNG, BT. Frequency response and vibration analysis in transformer winding turn-to-turn fault recognition. *In*: IEEE. **2016 International Conference on Smart Green Technology in Electrical and Information Systems (ICSGTEIS)**. [S.l.], 2016. p. 10–15.

BALAGEAS, Daniel. Introduction to structural health monitoring. **Structural health monitoring**, Wiley Online Library, p. 13–43, 2006.

BAPTISTA, Fabricio G; FILHO, Jozue Vieira; INMAN, Daniel J. Sizing pzt transducers in impedance-based structural health monitoring. **IEEE Sensors Journal**, IEEE, v. 11, n. 6, p. 1405–1414, 2010.

BASAK, Amitava. Condition monitoring of power transformers. **Engineering Science and Education Journal**, IET, v. 8, n. 1, p. 41–46, 1999.

BELANGER, M. Transformer diagnosis: Part 3: Detection techniques and frequency of transformer testing. **Electricity Today**, v. 11, n. 8, p. 19–26, 1999.

BENGTSSON, Claes. Status and trends in transformer monitoring. **IEEE Transactions on Power delivery**, IEEE, v. 11, n. 3, p. 1379–1384, 1996.

BERLER, Zalya; GOLUBEV, Alexander; RUSOV, Valery; TSVETKOV, Vladimir; PATTERSON, Cal. Vibro-acoustic method of transformer clamping pressure monitoring. *In: IEEE. Conference Record of the 2000 IEEE International Symposium on Electrical Insulation (Cat. No. 00CH37075)*. [S.l.], 2000. p. 263–266.

BETZ, Daniel C; THURSBY, Graham; CULSHAW, Brian; STASZEWSKI, Wieslaw J. Structural damage location with fiber bragg grating rosettes and lamb waves. **Structural health monitoring**, Sage Publications Sage UK: London, England, v. 6, n. 4, p. 299–308, 2007.

CAI, Jian; QIU, Lei; YUAN, Shenfang; SHI, Lihua; LIU, PeiPei; LIANG, Dong. Structural health monitoring for composite materials. *In: Composites and their applications*. [S.l.]: IntechOpen, 2012.

CHENG, Yangchun; TIAN, Xiao; LI, Chengrong *et al.* Using fiber bragg grating sensor on ice monitoring on electric power transmission lines, part i: The measurement of the temperature. *In: IEEE. 2010 International Conference on High Voltage Engineering and Application*. [S.l.], 2010. p. 256–259.

CHTCHERBAKOV, Anatoli A; SWART, Pieter L. Chirped fiber-optic bragg grating interrogator in a multiplexed bragg grating sensor configuration. **Journal of lightwave technology**, IEEE, v. 22, n. 6, p. 1543, 2004.

CIGRE, Conseil international des grands réseaux électriques. Comité d'études A2. **Mechanical Condition Assessment of Transformer Windings Using Frequency Response Analysis, FRA**. [S.l.]: CIGRÉ, 2008.

CONTIN, Alfredo; RABACH, Germano; BORGHETTO, Johnny; NIGRIS, Michele De; PASSAGLIA, Renzo; RIZZI, Giuseppe. Frequency-response analysis of power transformers by means of fuzzy tools. **IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation**, IEEE, v. 18, n. 3, p. 900–909, 2011.

COPEL. **Companhia Paranaense de Energia - Copel em Resumo**. 2019. Disponível em: <http://bit.ly/3ddOkEu>.

\_\_\_\_\_. **Companhia Paranaense de Energia - Sistema de Distribuição**. 2019. Disponível em: <https://bit.ly/2xdpIvc>.

\_\_\_\_\_. **Explosão em transformador subestação**. 2020. Disponível em: <https://bit.ly/2z2AhIS>.

CORREIA, Daniel Afonso Lourenço. **Estudo do efeito da percentagem de fibra na resistência à fadiga de compósitos de fibra curta carbono/epóxi**. 2017. Tese (Doutorado) — Universidade de Coimbra, 2017.



DICK, EP; ERVEN, CC. Transformer diagnostic testing by frequency response analysis. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, IEEE, n. 6, p. 2144–2153, 1978.

DREYER, Uilian José; MEZZADRI, Felipe; DUTRA, Guilherme; SILVA, Thiago da; BAVASTRI, Carlos Alberto; SILVA, Erlon Vagner da; MARTELLI, Cicero; SILVA, Jean Carlos Cardozo da. Quasi-distributed optical fiber transducer for simultaneous temperature and vibration sensing in high-power generators. **IEEE Sensors Journal**, IEEE, v. 18, n. 4, p. 1547–1554, 2017.

DUVAL, Micheal. Dissolved gas analysis: It can save your transformer. **IEEE Electrical Insulation Magazine**, IEEE, v. 5, n. 6, p. 22–27, 1989.

FARINA, Luís Cláudio. **Caracterização viscoelástica por meio de ensaios de fluência e ruptura por fluência de compósitos poliméricos de matriz de resina epoxídica e fibra de carbono**. 2009. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 2009.

FESER, K; CHRISTIAN, J; NEUMANN, C; SUNDERMANN, U; LEIBFRIED, T; KACHLER, A; LOPPACHER, M. The transfer function method for detection of winding displacements on power transformers after transport, short circuit or 30 years of service. **CIGRE**, v. 12, p. 33–04, 2000.

GALVÃO, José Rodolfo; ZAMARREÑO, Carlos R; MARTELLI, Cicero; SILVA, Jean Carlos Cardozo Da; ARREGUI, Francisco J; MATÍAS, Ignacio R. Strain mapping in carbon-fiber prosthesis using optical fiber sensors. **IEEE Sensors Journal**, IEEE, v. 17, n. 1, p. 3–4, 2016.

GALVÃO, José Rodolfo; ZAMARREÑO, Carlos R; MARTELLI, Cicero; SILVA, Jean Carlos Cardozo da; ARREGUI, Francisco J; MATIAS, Ignacio R. Smart carbon fiber transtibial prosthesis based on embedded fiber bragg gratings. **IEEE Sensors Journal**, IEEE, v. 18, n. 4, p. 1520–1527, 2017.

GARG, Devendra P; ZIKRY, Mohammed A; ANDERSON, Gary L. Current and potential future research activities in adaptive structures: an aro perspective. **Smart materials and structures**, IOP Publishing, v. 10, n. 4, p. 610, 2001.

GHANI, Sharin Ab; THAYOOB, YH Md; GHAZALI, YZ Yang; KHIAR, MS Ahmad; CHAIRUL, I Sutan. Evaluation of transformer core and winding conditions from sfr measurement results using statistical techniques for distribution transformers. *In: IEEE. 2012 IEEE International Power Engineering and Optimization Conference Melaka, Malaysia*. Melaka, Malaysia, 2012. p. 448–453.

GRECHKO, ON; KALACHEVA, NI. Current trends in the development of in-service monitoring and diagnostic systems for 110-750 kv power transformers (a survey). **APPLIED**

**ENERGY-NEW YORK-C/C OF IZVESTIIA-ROSSIISKAIA AKADEMIIA NAUK ENERGETIKA**, ALLERTON PRESS, INC., v. 34, p. 84–97, 1996.

HEINDL, Maximilian; TENBOHLEN, Stefan; VELÁSQUEZ, Juan; KRAETGE, Alexander; WIMMER, René. Transformer modeling based on frequency response measurements for winding failure detection. *In: Proceedings of the 2010 International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis*. [S.l.: s.n.], 2010. p. 201–204.

HILL, KO; FUJII, Y; JOHNSON, Derwyn C; KAWASAKI, BS. Photosensitivity in optical fiber waveguides: Application to reflection filter fabrication. **Applied physics letters**, American Institute of Physics, v. 32, n. 10, p. 647–649, 1978.

HILL, Kenneth O; MALO, B; BILODEAU, F; JOHNSON, DC; ALBERT, Jacques. Bragg gratings fabricated in monomode photosensitive optical fiber by uv exposure through a phase mask. **Applied Physics Letters**, American Institute of Physics, v. 62, n. 10, p. 1035–1037, 1993.

HILL, Kenneth O; MELTZ, Gerald. Fiber bragg grating technology fundamentals and overview. **Journal of lightwave technology**, IEEE, v. 15, n. 8, p. 1263–1276, 1997.

KAGAWA, H; MAEKAWA, T; YAMAGATA, Y; NISHIWAKI, S; CHIGIRI, T; SAIDA, T; HOSOKAWA, O. Measurement and computation of transient recovery voltage of transformer limited fault in 525kv–1500mva three-phase transformer. *In: IEEE. PES T&D 2012*. [S.l.], 2012. p. 1–7.

KANNAN, SR; RAO, Y Narayana. Generator loading limits for impulse testing low-inductance windings. *In: IET. Proceedings of the Institution of Electrical Engineers*. [S.l.], 1975. v. 122, n. 5, p. 535–538.

KERSEY, Alan D; DAVIS, Michael A; PATRICK, Heather J; LEBLANC, Michel; KOO, KP; ASKINS, CG; PUTNAM, MA; FRIEBELE, E Joseph. Fiber grating sensors. **Journal of lightwave technology**, IEEE, v. 15, n. 8, p. 1442–1463, 1997.

KIM, Myonghwan; LEE, June-Ho; KOO, Ja-Yoon; SONG, Minho. A study on internal temperature monitoring system for power transformer using optical fiber bragg grating sensors. *In: IEEE. 2008 International Symposium on Electrical Insulating Materials (ISEIM 2008)*. [S.l.], 2008. p. 163–166.

KITAGAWA, Wataru; ISHIHARA, Yoshiyuki; TODAKA, Toshiyuki; NAKASAKA, Akira. Analysis of structural deformation and vibration of a transformer core by using magnetic property of magnetostriction. **Electrical Engineering in Japan**, Wiley Online Library, v. 172, n. 1, p. 19–26, 2010.

KUBIAK, WITOLD. Identification of magnetostriction vibrations in power transformers. **Zeszyty Naukowe. Elektryka/Politechnika Łódzka**, v. 109, p. 51–61, 2006.

KUN, Zhang; FENGHUA, WANG; TIANMING, LIAO *et al.* Detection of transformer winding deformation under sudden short-circuit impact based on complex wavelet algorithm. **Transactions of China Electrotechnical Society**, v. 29, n. 8, p. 327–332, 2014.

KUNG, Peter; IDSINGA, Robert; FU, Jian Bin; DURAND, H-Chaska V; YANG, Chang Shui; COMANICI, Maria Iulia. Online detection of windings distortion in power transformers by direct vibration measurement using a thin fiber optics sensor. *In: IEEE. 2016 IEEE Electrical Insulation Conference (EIC). [S.l.]*, 2016. p. 576–578.

LAU, KT. Structural health monitoring for smart composites using embedded fbg sensor technology. **Materials Science and Technology**, Taylor & Francis, v. 30, n. 13, p. 1642–1654, 2014.

LEE, June-Ho; KIM, Soo-Gil; PARK, Hyoung-Jun; SONG, Minho. Investigation of fiber bragg grating temperature sensor for applications in electric power systems. *In: IEEE. 2006 IEEE 8th International Conference on Properties & applications of Dielectric Materials. [S.l.]*, 2006. p. 431–434.

LEIBFRIED, T; FESER, K. Monitoring of power transformers using the transfer function method. **IEEE Transactions on Power Delivery**, IEEE, v. 14, n. 4, p. 1333–1341, 1999.

LI, Hong-kui; LI, Yan. Axial vibration modal analysis of transformer windings under different levels of pre-compression. **Electric Machines and Control**, v. 14, n. 8, p. 98–101, 2010.

LI, Ruiya; CHEN, Yiyang; TAN, Yuegang; ZHOU, Zude; LI, Tianliang; MAO, Jian. Sensitivity enhancement of fbg-based strain sensor. **Sensors**, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 18, n. 5, p. 1607, 2018.

LI, Xuebin; HUANG, Xu; ZHOU, Zhiqiang; ZHAO, Yisong; CHEN, Yanwen; SONG, Xuebin. Analysis of the measuring points selection of power transformer winding deformation through vibration test. *In: IEEE. 2016 China International Conference on Electricity Distribution (CICED). [S.l.]*, 2016. p. 1–5.

LIU, Yunqi; GUO, Zhuanyun; ZHANG, Ying; CHIANG, Kin Seng; DONG, Xiaoyi. Simultaneous pressure and temperature measurement with polymer-coated fibre bragg grating. **Electronics letters**, IET, v. 36, n. 6, p. 564–566, 2000.

LU, Weifeng; SHI, Yuhang; ZHU, Lingyu; ZHAN, Cao; JI, Shengchang. Study on the influence of temperature on transformer core vibration. *In: IEEE. 2018 IEEE International Power Modulator and High Voltage Conference (IPMHVC). [S.l.]*, 2018. p. 317–321.

MA, Guo-Ming; ZHOU, Hong-Yang; SHI, Cheng; LI, Ya-Bo; ZHANG, Qiang; LI, Cheng-Rong; ZHENG, Qing. Distributed partial discharge detection in a power transformer based on phase-shifted fbg. **IEEE Sensors Journal**, IEEE, v. 18, n. 7, p. 2788–2795, 2018.

MAK, J; MACIEL, L; FRANCHINI, LR; VAGNER, V. Transformador de distribuição de maior vida útil e menor agressividade ambiental. **IV WorkSpot, CIGRE Brasil**, p. 8, 2006.

MECHEFSKE, CK. Correlating power transformer tank vibration characteristics to winding looseness. **Insight**, v. 37, n. 8, p. 599–604, 1995.

MELO, Aguinaldo Goes de; BENETTI, Daniel; LACERDA, Luiz Alkimin de; PERES, Rodrigo; FLORIDIA, Claudio; SILVA, Artur de Araujo; ROSOLEM, Joao Batista. Static and dynamic evaluation of a winding deformation fbg sensor for power transformer applications. **Sensors**, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 19, n. 22, p. 4877, 2019.

MELTZ, G; MOREY, W\_W; GLENN, WH. Formation of bragg gratings in optical fibers by a transverse holographic method. **Optics letters**, Optical Society of America, v. 14, n. 15, p. 823–825, 1989.

MINHAS, MSA; REYNDERS, JP; KLERK, PJ De. Failures in power system transformers and appropriate monitoring techniques. *In*: IET. **1999 Eleventh International Symposium on High Voltage Engineering**. [S.l.], 1999. v. 1, p. 94–97.

MITCHELL, Steven D; WELSH, James S. Modeling power transformers to support the interpretation of frequency-response analysis. **IEEE Transactions on power delivery**, IEEE, v. 26, n. 4, p. 2705–2717, 2011.

MOREY, William W; MELTZ, Gerald; GLENN, William H. Fiber optic bragg grating sensors. *In*: INTERNATIONAL SOCIETY FOR OPTICS AND PHOTONICS. **Fiber Optic and Laser Sensors VII**. [S.l.], 1990. v. 1169, p. 98–107.

NBR5380, Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR5380: Transformador de Potência**. 1993.

NUSSENZVEIG, Herch Moysés. **Curso de Física Básica: fluidos, oscilações e ondas, calor**. [S.l.]: Editora Blucher, 2018. v. 2.

OLIVEIRA, R De; RAMOS, CA; MARQUES, AT. Health monitoring of composite structures by embedded fbg and interferometric fabry–pérot sensors. **Computers & structures**, Elsevier, v. 86, n. 3-5, p. 340–346, 2008.

OTHONOS, Andreas. Fiber bragg gratings. **Review of scientific instruments**, AIP, v. 68, n. 12, p. 4309–4341, 1997.

PICHER, Patrick; RAJOTTE, Claude; TARDIF, Carl. Experience with frequency response analysis (fra) for the mechanical condition assessment of transformer windings. *In: IEEE. 2013 IEEE Electrical Insulation Conference (EIC)*. [S.l.], 2013. p. 220–224.

QIAO, Xueguang; SHAO, Zhihua; BAO, Weijia; RONG, Qiangzhou. Fiber bragg grating sensors for the oil industry. *Sensors*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 17, n. 3, p. 429, 2017.

QUANG, Nguyen Dac; CUONG, Tran Quoc; KHANH, Dao Ngoc; KHANH, Nguyen Phu *et al.* Experimental investigation and modeling of the thermal cycling effect on the mechanical properties of cfrp. *In: IEEE. 2016 7th International Conference on Mechanical and Aerospace Engineering (ICMAE)*. [S.l.], 2016. p. 41–45.

RAGAVAN, K; SATISH, L. Construction of physically realizable driving-point function from measured frequency response data on a model winding. *IEEE Transactions on Power Delivery*, IEEE, v. 23, n. 2, p. 760–767, 2008.

RAO, Singiresu S. **Vibrações Mecânicas**. 4ª. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2008.

Ribeiro, C. d. J.; Marques, A. P.; Azevedo, C. H. B.; Souza, D. C. P.; Alvarenga, B. P.; Nogueira, R. G. Faults and defects in power transformers - a case study. *In: 2009 IEEE Electrical Insulation Conference*. [S.l.: s.n.], 2009. p. 142–145. ISSN 2334-0975.

RIKARDO, Siregar A; BAMBANG, Cahyono B; SUMARYADI, C; YULIAN, Tamsir D; ARIEF, Setyowibowo E; KHARIL, Solin F Irvan. Vibration monitoring on power transformer. *In: IEEE. 2008 International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis*. [S.l.], 2008. p. 1015–1016.

ROMERO, Murilo Araújo; CALLIGARIS, A; SILVA, MT Camargo. A fiber-optic bragg-grating temperature sensor for high-voltage transmission lines. *In: IEEE. 1997 SBMO/IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronics Conference. 'Linking to the Next Century' Proceedings*. [S.l.], 1997. v. 1, p. 34–38.

SCHWABE, RJ *et al.* On-line diagnostics of oil paper insulated instrument transformers. **International Council on Large Electric Systems (OGRE), Paris, France, 2000.**

SHENGCHANG, Ji; PING, Shan; YANMING, Li; DAKE, Xu; JUNLING, Cao. The vibration measuring system for monitoring core and winding condition of power transformer. *In: IEEE. Proceedings of 2001 International Symposium on Electrical Insulating Materials (ISEIM 2001). 2001 Asian Conference on Electrical Insulating Diagnosis (ACEID 2001). 33rd Symposium on Electrical and Ele*. Himeji, Japan, 2001. p. 849–852.

SHI, Yuhang; LU, Wefgel; ZHANG, Fan; DANG, Yongliang; ZHAN, Cao; JI, Shengchang; ZHU, Ziqian. Diagnosis of transformer winding looseness based on vibration sensor array. *In: IEEE. 2018 Condition Monitoring and Diagnosis (CMD)*. [S.l.], 2018. p. 1–5.

SOUSA, Kleiton de Morais; DREYER, Uilian José; MARTELLI, Cicero; SILVA, Jean Carlos Cardozo da. Thermal and vibration dynamic analysis of an induction motor using optical fiber Bragg gratings. *In: INTERNATIONAL SOCIETY FOR OPTICS AND PHOTONICS. 24th International Conference on Optical Fibre Sensors*. Curitiba, Brazil: SPIE, 2015. v. 9634, p. 516 – 519.

SOUSA, Kleiton de Morais; HAFNER, Angelo Alfredo; CRESPIM, Marcos; SOMENZI, Jonas; OLIVEIRA, Valmir de; KALINOWSKI, Hypolito José; SILVA, Jean Carlos Cardozo da. Fiber bragg grating sensing applications in temperature monitoring of three-phase induction motors. *In: IEEE. 2011 SBMO/IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronics Conference (IMOC 2011)*. [S.l.], 2011. p. 862–866.

SOUSA, Kleiton Morais; DREYER, Uilian Jose; MARTELLI, Cicero; SILVA, Jean Carlos Cardozo da. Dynamic eccentricity induced in induction motor detected by optical fiber bragg grating strain sensors. **IEEE Sensors Journal**, IEEE, v. 16, n. 12, p. 4786–4792, 2016.

SPARLING, B. Transformer monitoring and diagnostics. *In: IEEE. IEEE Power Engineering Society. 1999 Winter Meeting (Cat. No. 99CH36233)*. [S.l.], 1999. v. 2, p. 978–980.

SUN, Huo-Ching; HUANG, Yann-Chang; HUANG, Chao-Ming. A review of dissolved gas analysis in power transformers. **Energy Procedia**, Elsevier, v. 14, p. 1220–1225, 2012.

SUO, Rui; CHEN, Xianfeng; ZHOU, Kaiming; ZHANG, Lin; BENNION, Ian. 800 nm wdm interrogation system for strain, temperature, and refractive index sensing based on tilted fiber bragg grating. **IEEE Sensors Journal**, IEEE, v. 8, n. 7, p. 1273–1279, 2008.

TALIB, Mohd Aizam; GHAZALI, NoorAzlan Mohd; CHRISTIE, Melvin; ZAKARIA, Wan; HASHIM, Ismail; UTHMAN, S; JAMALI, MN. Diagnosis of transformer insulation condition using recovery voltage measurements. *In: IEEE. Proceedings. National Power Engineering Conference, 2003. PECon 2003*. [S.l.], 2003. p. 329–332.

URBANI, Giuseppe M; BROOKS, Roger S. Using the recovery voltage method to evaluate aging in oil-paper insulation. *In: IEEE. ICSD'98. Proceedings of the 1998 IEEE 6th International Conference on Conduction and Breakdown in Solid Dielectrics (Cat. No. 98CH36132)*. [S.l.], 1998. p. 93–97.

VICENTE, José Manuel Esteves; REZEK, Angelo José Junqueira; ALMEIDA, Antonio Tadeu Lyrio de; GUIMARÃES, Carlos Alberto Mohallem. Automation of the temperature elevation test in transformers with insulating oil. **ISA transactions**, Elsevier, v. 47, n. 1, p. 25–31, 2008.

WANG, MVAJ; VANDERMAAR, A John; SRIVASTAVA, K D\_. Review of condition assessment of power transformers in service. **IEEE Electrical insulation magazine**, IEEE, v. 18, n. 6, p. 12–25, 2002.

WANG, Peng; LIU, Jie; SONG, Fangchao; ZHAO, Hong. Quasi-distributed temperature measurement for stator bars in large generator via use of fiber bragg gratings. *In*: IEEE. **Proceedings of 2011 6th International Forum on Strategic Technology**. [S.l.], 2011. v. 2, p. 810–813.

WANG, Yuxing; PAN, Jie. Comparison of mechanically and electrically excited vibration frequency responses of a small distribution transformer. **IEEE Transactions on Power Delivery**, IEEE, v. 32, n. 3, p. 1173–1180, 2015.

WHITE, EL. Monitoring transformers in service for winding displacement using the low voltage impulse method. **ERA Technology, Rep**, n. 81-62R, 1981.

WU, Qiang; FARRELL, Gerald; SEMENOVA, Yuliya. Simple design technique for a triangular fbg filter based on a linearly chirped grating. **Optics Communications**, Elsevier, v. 283, n. 6, p. 985–992, 2010.

YOUSOF, M Fairouz M; EKANAYAKE, Chandima; SAHA, Tapan K. Frequency response analysis to investigate deformation of transformer winding. **IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation**, IEEE, v. 22, n. 4, p. 2359–2367, 2015.

ZHANG, Bo; YAN, Ning; DU, Jianmin; HAN, Fangxu; WANG, Huan. A novel approach to investigate the core vibration in power transformers. **IEEE Transactions on Magnetics**, IEEE, v. 54, n. 11, p. 1–4, 2018.

ZHANG, Fan; JI, Shengchang; QIAN, Guochao; ZOU, Dexu; XU, Xiaowei. The study on vibration characteristic of power transformer in short circuit by transfer function. *In*: IEEE. **2015 IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC)**. Brisbane, QLD, Australia, 2015. p. 1–4.

ZHANG, Ying; FENG, Dejun; LIU, Zhiguo; GUO, Zhuanyun; DONG, Xiaoyi; CHIANG, KS; CHU, Beatrice CB. High-sensitivity pressure sensor using a shielded polymer-coated fiber bragg grating. **IEEE Photonics Technology Letters**, IEEE, v. 13, n. 6, p. 618–619, 2001.

ZHAO, Yong; WANG, Qi; HUANG, He. Characteristics and applications of tilted fiber bragg gratings. **Journal of optoelectronics and advanced materials**, INOE 2000, v. 12, n. 12, p. 2343–2354, 2010.

ZHENG, Qing; MA, Guoming; JIANG, Jun; LI, Chengrong; ZHAN, Huamao. A comparative study on partial discharge ultrasonic detection using fiber bragg grating sensor and piezoelectric

transducer. *In*: IEEE. **2015 IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP)**. [S.l.], 2015. p. 282–285.



## **APÊNDICES**

## APÊNDICE A – PUBLICAÇÕES RESULTANTES DESTA TESE

### A.1 ARTIGOS PUBLICADOS EM PERIÓDICOS

- **G. G. Kuhn**, K. M. Sousa, C. Martelli, C. A. Bavastri and J. C. C. d. Silva, "**Embedded FBG Sensors in Carbon Fiber for Vibration and Temperature Measurement in Power Transformer Iron Core**," in IEEE Sensors Journal, vol. 20, no. 22, pp. 13403-13410, 15 Nov.15, 2020, doi: 10.1109/JSEN.2020.3005884.

### A.2 ARTIGOS PUBLICADOS EM ANAIS DE CONGRESSOS INTERNACIONAIS

- **KUHN, Gustavo Gomes**; SOUSA, Kleiton de Moraes; GALVÃO, José Rodolfo; MARTELLI, Cicero; DA SILVA, Jean Carlos Cardozo. **Improving sensitivity of FBG strain sensor embedded in polymer attached at transformer core**. In: IMOC 2019 - SBMO/IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronics Conference, 2019, Aveiro. Proceedings of the 2019 SBMO/IEEE MTT-S. Piscataway, NJ, Estados Unidos: IEEE, 2019. v. único. p. 1-3.
- **KUHN, Gustavo Gomes**; SOUSA, Kleiton de Moraes; DA SILVA, Jean Carlos Cardozo. **Dynamic Strain Analysis of Transformer Iron Core with Fiber Bragg Gratings**. In: Bragg Gratings, Photosensitivity and Poling in Glass Waveguides and Materials, 2018, Zurich. Advanced Photonics 2018, v. único. p. JTU2A.74.

### A.3 ARTIGOS APRESENTADOS EM CONGRESSOS INTERNACIONAIS

- **KUHN, Gustavo Gomes**<sup>1</sup>; SOUSA, Kleiton de Moraes; GALVÃO, José Rodolfo; MARTELLI, Cicero; DA SILVA, Jean Carlos Cardozo. **Improving sensitivity of FBG strain sensor embedded in polymer attached at transformer core**. In: IMOC 2019 - SBMO/IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronics Conference, 2019, Aveiro. Proceedings of the 2019 SBMO/IEEE MTT-S. Piscataway, NJ, Estados Unidos: IEEE, 2019. v. único. p. 1-3.
- **KUHN, Gustavo Gomes**; SOUSA, Kleiton de Moraes; DA SILVA, Jean Carlos Cardozo<sup>2</sup>.

<sup>1</sup> Apresentou o artigo, Aveiro/POR

<sup>2</sup> Apresentou o artigo, Zurique/SWI

**Dynamic Strain Analysis of Transformer Iron Core with Fiber Bragg Gratings.** In: Bragg Gratings, Photosensitivity and Poling in Glass Waveguides and Materials, 2018, Zurich. Advanced Photonics 2018, v. único. p. JTU2A.74.


#### A.4 DEPÓSITO DE PATENTE


- **Título: Dispositivo fotorrefrativo revestido de material compósito para medição simultânea de vibração e temperatura em núcleo de transformadores.**

Número do Processo INPI: BR1020180679210

Data: Outubro/2018

Autores/Inventores: **KUHN, Gustavo Gomes**; DA SILVA, Jean Carlos Cardozo; GALVÃO, José Rodolfo; MARTELLI, Cícero.



**(21) BR 102018067921-0 A2** 

**(22) Data do Depósito: 05/09/2018**

**(43) Data da Publicação Nacional: 17/03/2020**

República Federativa do Brasil  
Ministério da Economia  
Instituto Nacional da Propriedade Industrial

---

**(54) Título:** DISPOSITIVO FOTORREFRATIVO REVESTIDO DE MATERIAL COMPÓSITO PARA MEDIÇÃO SIMULTÂNEA DE VIBRAÇÃO E TEMPERATURA EM NÚCLEO DE TRANSFORMADORES

**(51) Int. Cl.:** G02B 6/02; G01K 11/32; G01H 9/00.

**(52) CPC:** G02B 6/02209; G01K 11/3206; G01H 9/004.

**(71) Depositante(es):** UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ.

**(72) Inventor(es):** JEAN CARLOS CARDOZO DA SILVA; GUSTAVO GOMES KUHN; JOSÉ RODOLFO GALVÃO; CÍCERO MARTELLI.

**(57) Resumo:** DISPOSITIVO FOTORREFRATIVO REVESTIDO DE MATERIAL COMPÓSITO PARA MEDIÇÃO SIMULTÂNEA DE VIBRAÇÃO E TEMPERATURA EM NÚCLEO DE TRANSFORMADORES O presente pedido de patente de invenção refere-se a um dispositivo fotorrefrativo utilizado para a medição simultânea de temperatura e vibração em transformadores de energia elétrica. Pode ser aplicado a qualquer tipo de transformador refrigerado a óleo ou a seco, mas principalmente empregado diretamente no núcleo de transformadores de distribuição de energia elétrica de qualquer potência. O dispositivo emprega um encapsulamento de compósito de fibra de carbono ou de vidro (2) para proteção das fibras ópticas (8) que contém elementos sensores baseados em dispositivos fotorrefrativos FBG (Fiber Bragg Gratings) (6) e (7). O encapsulamento tem a função principal de agilidade no processo de fixação dos sensores ao núcleo, além de envolver e proteger os sensores em fibra óptica e propiciar contato moldado e adequado ao núcleo do transformador, favorecendo a transferência de calor e ondas mecânicas de vibração para as devidas medições de temperatura e deformação.

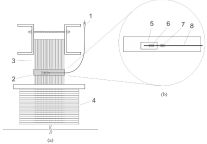


Figura 2

## APÊNDICE B – DESCRIÇÃO DA PATENTE

### B.1 DISPOSITIVO FOTORREFRATIVO REVESTIDO DE MATERIAL COMPÓSITO PARA MEDIÇÃO SIMULTÂNEA DE VIBRAÇÃO E TEMPERATURA EM NÚCLEO DE TRANSFORMADORES

1. O presente pedido de Patente de Invenção refere-se a um dispositivo fotorrefrativo revestido de material compósito como, por exemplo, fibra de carbono ou de vidro, para medição simultânea de vibração e temperatura diretamente no núcleo de transformadores de energia elétrica.
2. Em sistemas de geração, transmissão e distribuição, o transformador de energia é um dos dispositivos mais importantes. A vibração mecânica tem sua origem no núcleo, que é excitado principalmente por forças de magnetostricção e por forças de atração e repulsão magnéticas, já que o núcleo é constituído basicamente por um conjunto de chapas justapostas. A medida que o fluxo magnético percorre essas chapas, causa um leve movimento de atração entre elas gerando um movimento ondulatório que causa a vibração no transformador. Esta vibração é monitorada por meio de sensores tradicionais.
3. Esses sensores são instalados em pontos específicos de interesse, normalmente na carcaça dos transformadores (partes externas). Essa forma de medição monitora todo o bloco do transformador, ou seja, todas as partes do equipamento sem diferenciar qual a principal fonte geradora de vibração (núcleo). Conseqüentemente, os processos de medição indireta em carcaças utilizando sensores tradicionais, apresentam erros, citam-se: amortecimento através dos fluídos refrigeradores (óleo, água), afrouxamento dos parafusos de fixação que prendem o núcleo do transformador a carcaça, medições indiretas em pontos de interesse desconhecidos e com pouca ou nenhuma deformação, entre outros. Portanto, a medição acontece de forma indireta e com várias fontes que distorcem a leitura correta que é originária no núcleo.
4. O uso de sensores com fibras ópticas é relatado em diversas patentes de invenção, tais como: BR1020140030697 que se refere a um transdutor para o monitoramento de temperatura em mancais e radiadores de geradores elétricos e que utiliza uma haste de cerâmica com duas fibras ópticas com redes de Bragg; BR1020140111298 que se refere a um sistema para medir a temperatura em cabos condutores subterrâneos; BR1020150020619, que descreve

o método de instalação de sensores de temperatura distribuídos que podem monitorar a temperatura de um estator de um gerador hidrelétrico com maior resolução.

5. Outro pedido de patente importante é BR1020160080932, pois apresenta um enfoque semelhante ao trabalho proposto, porque também realiza uma medição simultânea de vibração e temperatura, mas, entretanto, em geradores de energia elétrica, diferindo na aplicação, formato do sensor e outro modelo de encapsulamento. Os elementos sensores foram posicionados nas ranhuras de um gerador elétrico. Tem uma vantagem clara aos sensores convencionais devido a possibilidade de monitoração de 'n' pontos em uma ou mais fibras ópticas, de forma multiplexada. Os autores usaram um invólucro que armazena líquido viscoso, que por sua vez, transmite calor e o movimento vibratório do gerador, na forma de ondas mecânicas, até os elementos sensores.
6. Uma patente internacional, WO2017152246, refere-se a um módulo sensor ótico com redes de Bragg em fibra óptica e um sistema de interrogação com sintonia e compensação de temperatura automáticas para monitoração de altas tensões elétricas. Outro registro internacional investigado ES2265223B1, refere-se a um método que emprega dispositivo de medida de vibrações por interferometria óptica. O sistema emprega um sensor interferométrico de fibra óptica, que é disposto em contato com a superfície do objeto de medida, e retorna um sinal proporcional às vibrações desse elemento. Foi utilizado inicialmente para a medição de vibração em núcleos e enrolamentos no interior de transformadores, mas não emprega o uso de nenhum tipo de encapsulamento, a medição é diretamente realizada com a fibra óptica. Ressalta-se a fragilidade da fibra óptica quando está sem a proteção mecânica do acrilato e capas adicionais. Portanto, também visando resistência mecânica, o presente pedido apresenta uma estrutura de encapsulamento em material compósito que oferece esta resistência muito alta ao elemento sensor, com módulo de elasticidade de 5000 MPa, tornando-o robusto a aplicações hostis, como é o caso de medições internas no transformador.
7. De um aspecto geral, os sensores fotorrefrativos empregados nessa medição de temperatura e vibração têm características de aplicação e vantagens muito evidenciadas, se comparados aos sensores eletromecânicos convencionais comerciais, por apresentarem: imunidade a interferência eletromagnética, baixa perda na transmissão do sinal (inferior a 0,2 dB/Km) quando operados em comprimentos de onda central próximos a 1550 nm. As fibras ópticas

monomodo padrão (Standard Single Mode Fiber - SSMF) possuem diâmetro externo de  $125 \mu\text{m}$ , permitindo medições de temperatura e vibração de forma pontual e tamanho reduzido, conforme dados do fabricante. Normalmente o sinal da medição é codificado em comprimento de onda de banda estreita, o que torna possível multiplexar vários elementos sensores numa mesma fibra óptica.

8. Sensores para medir vibrações são conhecidos com base em efeitos eletromecânicos, piezo-resistivos e, principalmente, piezelétricos. No entanto, esses sensores não apresentam uma resposta adequada a sinais de baixa frequência ou de baixa intensidade ou ainda, funcionam de forma defeituosa em ambientes com campos eletromagnéticos fortes, condições estas que ocorrem dentro e ao entorno de transformadores elétricos. Por outro lado, o bom funcionamento dos transformadores está relacionado a várias condições não elétricas. Essas magnitudes incluem principalmente as vibrações mecânicas dos elementos constituintes, de carcaça, núcleo e enrolamentos, conforme ES2265223B1. Portanto, para analisar adequadamente o funcionamento do transformador em sua vida útil e em resposta a diferentes demandas de carga elétrica, é necessário obter medições dessas grandezas no interior do transformador. Como muitas dessas medidas internas são inacessíveis, é necessário usar medidas e estimativas indiretas e que por sua vez, podem levar a erros e a diagnósticos falsos da operação do equipamento. Além disso, o diagnóstico de falhas já é tardio, provocando a manutenção corretiva.
9. O diferencial deste sistema sensor fotorrefrativo está na medição direta da deformação dinâmica e temperatura no núcleo do transformador. Apresenta forma simples e de rápida fixação, facilitando sua instalação conforme as Figura 51, Figura 52 e Figura 53. O dispositivo é fabricado em compósito reforçado de fibra de carbono ou de vidro, que em sua composição possui: tecido de fibra de carbono ou de vidro, resina epóxi e endurecedor. O modelo da resina epóxi e endurecedor deve ter características térmicas adequadas, conforme fabricante. Esse compósito deve suportar temperaturas de até aproximadamente  $150 \text{ }^\circ\text{C}$ , não alterando as características do material quando submetidos ao ambiente hostil de operação do transformador. A fibra óptica contendo os sensores fotorrefrativos de temperatura e vibração está embarcada no invólucro, e desta maneira, tem proteção contra danos mecânicos devido à alta resistência mecânica e ao alto módulo de elasticidade do compósito.

10. A medição simultânea de temperatura e vibração se dá por intermédio de dispositivos fotorrefrativos. Esses dispositivos podem ser redes de Bragg em fibra óptica com chirp, inclinada, apodizada, regenerada, com deslocamento de fase ou qualquer outra configuração fotorrefrativa, gravadas ao longo do núcleo do eixo longitudinal da fibra óptica. Uma das possíveis hipóteses para a aplicação é, mas não se limita, a medição dinâmica diretamente no núcleo de transformadores de distribuição, dos parâmetros físicos de vibração e temperatura, simultaneamente.
11. A presente solicitação de Patente de Invenção se refere ao desenvolvimento de um invólucro de fibra de carbono ou de vidro, de fácil instalação, que revestirá sensores de vibração e temperatura e que farão a medição simultaneamente e diretamente no núcleo do transformador de energia elétrica.
12. Na sequência são apresentadas as figuras para melhor explicar o pedido de Patente de forma ilustrativa e não limitativa.
13. Figura 51: Vista lateral (a) e vista frontal (b) de um transformador monofásico de energia elétrica com núcleo em forma UI.
14. Figura 52: Vista lateral (a) em corte evidenciando o posicionamento do encapsulamento dos sensores e, vista ampliada (b) do invólucro.
15. Figura 53: Vista em perspectiva do encapsulamento (5) para os sensores FBG. Nesse protótipo a peça é de fibra de carbono ou de vidro e envolve o núcleo do transformador em formato de grampo ou clipe e com característica de engate rápido.
16. Figura 54: Vista da face onde estão dispostos os sensores. Face modificada (a) e (b) em formato de mola. Proporciona aumento da sensibilidade do sensor.
17. Itens das figuras:
  - a) conector ótico
  - b) invólucro de compósito de fibra de carbono ou de vidro
  - c) núcleo do transformador
  - d) enrolamentos do transformador
  - e) tubo de alumina

- f) sensores FBG de temperatura
  - g) sensores FBG de vibração
  - h) fibra óptica SSMF (monomodo padrão) ou GF1 (fotossensível), por exemplo.
18. O invento será explicado evidenciando-se as numerações de acordo com as figuras supracitadas.
19. A Figura 51 apresenta o transformador de energia elétrica e o posicionamento do encapsulamento, do compósito de fibra de carbono ou fibra vidro, dos sensores óticos, em formato de cinta (2) em torno do núcleo do transformador. A posição do dispositivo é logo acima dos enrolamentos, podendo ser do lado primário ou secundário. A Figura 51 também mostra como ficará acoplado o dispositivo ao núcleo do transformador. Esse acoplamento se dá de forma justa, e sem folgas. Dessa forma, aumenta a área de contato entre eles.
20. Na Figura 52 é apresentada a vista lateral do transformador (a), e o posicionamento dos sensores óticos dentro do encapsulamento de material compósito (b). Destacam-se os seguintes itens: tubo de alumina (5), responsável pela isolamento térmica do sensor FBG de temperatura (6). O sensor que realiza a medição de vibração é visto em (7), e a fibra óptica SSMF (8).
21. O aparato onde é montado os sensores pode ter algumas nomenclaturas, podendo ser chamado de encapsulamento, grampo, clipe. A Figura 53 destaca esse aparato de compósito de carbono (2) e que **tem a principal função do invento, que é propiciar uma instalação rápida e de forma simples dos sensores óticos ao núcleo do transformador**. Levando em consideração que o clipe dá resistência mecânica aos sensores em fibra óptica, tornando sua aplicabilidade acessível às condições hostis de operação da máquina. Visto que o módulo de elasticidade transversal de um compósito de fibra de carbono é de aproximadamente 5,0 GPa. E desta forma, tornará o conjunto de sensores mais robusto.
22. Para o processo de fabricação do dispositivo compósito, as seguintes etapas devem ser seguidas e levando em consideração que sempre se deve adequar as dimensões equivalentes ao núcleo do transformador quem uso.
23. Criar um molde metálico de alumínio maciço (ou outro metal), de dimensões equivalente ao núcleo do transformador. Cuidar para o molde ter os cantos retos (90 °C), que é a característica dos núcleos de ferro de chapas justapostas.



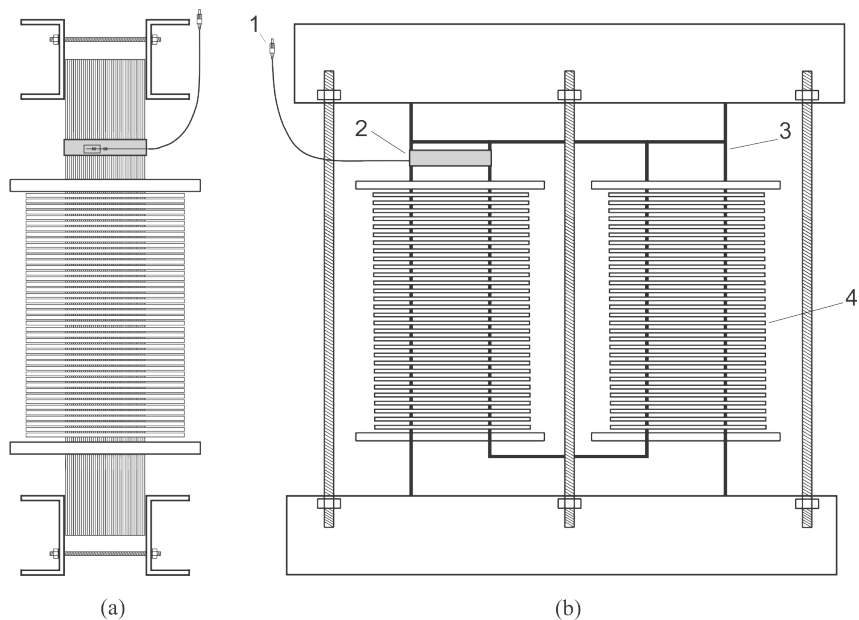
24. Realizar o corte do tecido de fibra de carbono de dimensão ao perímetro do núcleo (molde).  
Levar em consideração a quantidade de camadas que serão empregadas ao clipe.
25. O próximo processo é a mistura da resina epóxi (331) ao endurecedor (043) do fabricante Dow Chemical Company (ou qualquer resina de mesma especificação). A proporção usada é 2:1 (resina/endurecedor). A mistura deve ser agitada a fim de deixá-la homogênea e sem bolhas de ar. Esta etapa deve respeitar o tempo de 10 a 20 min, pois a resina começa seu processo de endurecimento. Faz-se a impregnação da mistura homogênea às camadas de fibra de carbono. Em cada camada deposita-se a resina cobrindo toda a superfície do tecido de fibra de carbono. Retirar os excessos.
26. Após construção da estrutura (moldar), camada a camada, recobre-se com tecido que dará acabamento texturizado ao clipe. Então, envolve-se a peça com um revestimento plástico com tratamento térmico (resistente a temperatura) e aplica-se vácuo, para retirar os excessos de resina. Leva-se então, à estufa para o processo de cura da resina. Fica uma hora a 80 °C e as próximas sete horas a 120 °C. Totalizando oito horas de cura da resina epóxi.
27. Na sequência, há a etapa de desenformar a peça e recorte das rebarbas do compósito. Este processo deve ser cuidadoso, para não provocar rachaduras ou até mesmo a fratura completa da peça.
28. Após, usando uma ferramenta de micro retífica, dá-se a forma de clipe, lembrando que as dimensões devem ser respeitadas para cada tipo de núcleo do transformador.
29. O próximo passo é realizar a colagem dos sensores FBG de temperatura e vibração. Para tal, usa-se cola a base de cianoacrilato. É realizado um pré-tensionamento na fibra óptica. Cada sensor é colado em uma única face do clipe, como pode ser observado na Figura 53. O sensor de temperatura é posicionado e colado internamente a um microtubo de alumina, que servirá para isolar o sensor térmico. Este sensor será o compensador de temperatura do sensor de vibração.
30. A última camada (externa) de fibra de carbono é incorporada ao clipe. Repetindo todas as etapas anteriores. E o processo de fabricação do clipe se finaliza. Para finalização da peça, realiza-se apenas lixamento e acabamento da peça. Novamente tomando o cuidado para não danificar a fibra óptica contendo os sensores.

31. A quantidade de camadas incorporadas ao clipe é determinada pela sensibilidade que se deseja obter dos sensores. Quanto maior o número de camadas, maior robustez, mas menor sensibilidade, e vice-versa.
32. Existem outras geometrias que podem ser trabalhadas para o aumento da sensibilidade do sensor de vibração. Uma dessas geometrias é a mola, e é apresentada na Figura 54(a). A quantidade de espaçamentos irá implicar na sensibilidade do clipe. A correlação entre eles é, quanto maior o número de espaçamentos, maior a sensibilidade. O que de certa forma diminui a robustez, quanto maior o número de espaçamentos, menor a resistência a mecânica da peça. Para um aumento ainda maior na sensibilidade, pode-se deixar exposto o sensor de vibração em um dos espaçamentos, muito embora esta situação fragilize a fibra óptica a riscos de rompimento. Está apresentado na Figura 54(b).
33. A descrição do dispositivo fotorrefrativo feita neste pedido de Patente de Invenção fornece uma forma exemplar preferencial, no entanto, não se pretende limitar o escopo, aplicabilidade ou configuração. Entende-se que alterações podem ser feitas no material, composição, dimensões e arranjo dos elementos, e sem se perder a essência da invenção.

## B.2 FIGURAS DA DESCRIÇÃO DA PATENTE

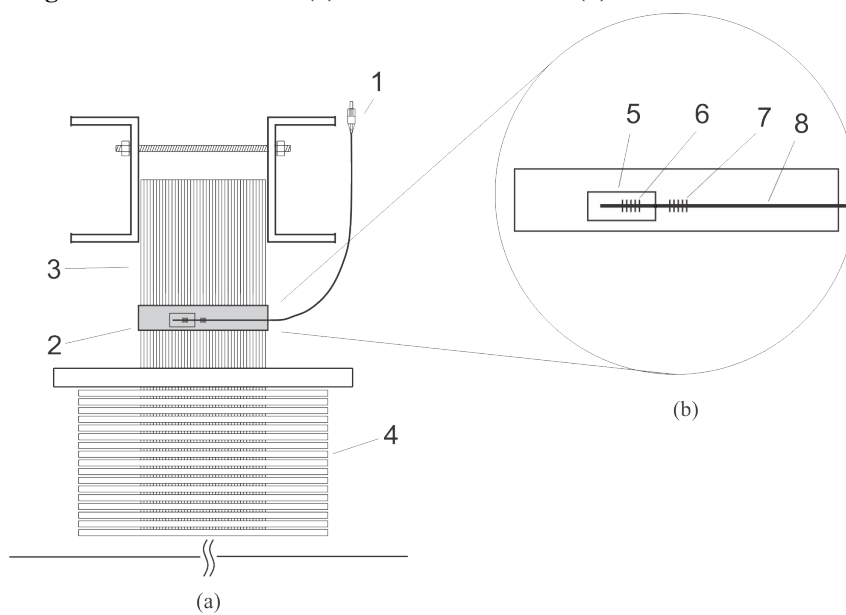
As figuras a seguir se referem a patente. A descrição de cada uma delas já foi detalhadamente abordada no item anterior.

**Figura 51 – Patente: Transformador, em (a) vista lateral e (b) vista frontal**



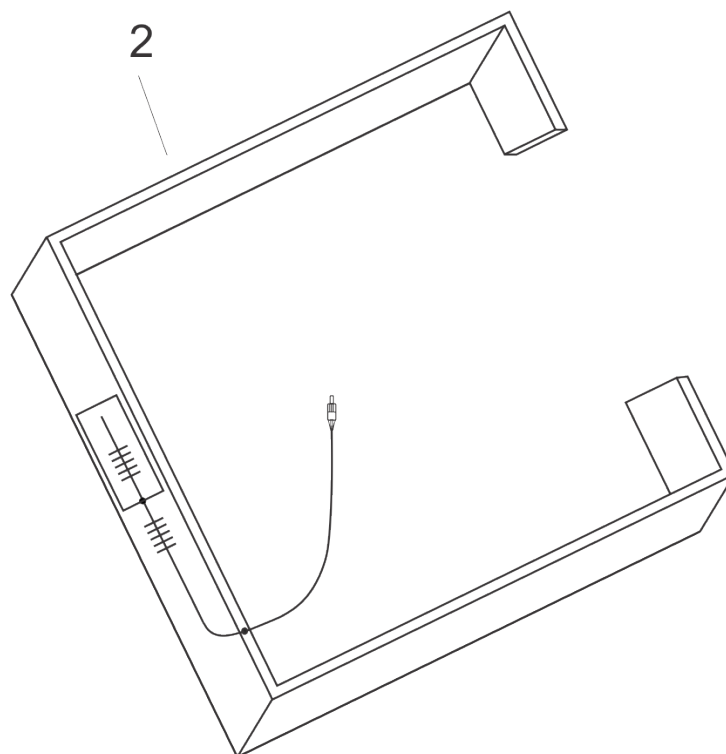
**Fonte: Autoria própria**

**Figura 52 – Patente: Em (a) transformador e em (b) detalhe dos sensores**



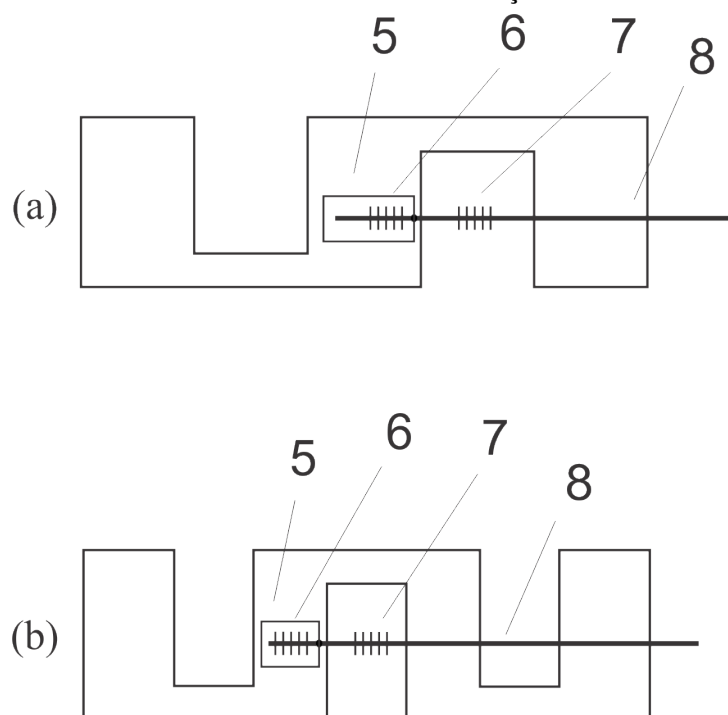
**Fonte: Autoria própria**

**Figura 53 – Patente: grampo de engate rápido**



Fonte: Autoria própria

**Figura 54 – Patente: faces em formato de mola, aumento da sensibilidade do sensor de deformação**



Fonte: Autoria própria