

FACULDADES DOCTUM DE CARATINGA

RENATO FLORENTINO VIEIRA

**SISTEMA DE MONITORAMENTO DE TEMPERATURA DISTRIBUÍDA EM
TRANSFORMADORES MONOFÁSICOS USANDO FIBRA ÓPTICA**

CARATINGA

2018

RENATO FLORENTINO VIEIRA
FACULDADES DOCTUM DE CARATINGA

**SISTEMA DE MONITORAMENTO DE TEMPERATURA DISTRIBUÍDA EM
TRANSFORMADORES MONOFÁSICOS USANDO FIBRA ÓPTICA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Elétrica das Faculdades Doctum de Caratinga, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Área de concentração: Sistema Elétrico de Potência.

Orientador: Prof. Guilherme Cassimiro de Araújo Borges.

CARATINGA

2018

TERMO DE APROVAÇÃO

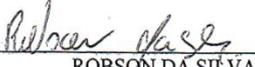
O Trabalho de Conclusão de Curso intitulado: SISTEMA DE MONITORAMENTO DE TEMPERATURA DISTRIBUÍDA EM TRANSFORMADORES MONOFÁSICOS USANDO FIBRA ÓPTICA, elaborado pelo(s) aluno(s) RENATO FLORENTINO VIEIRA foi aprovado por todos os membros da Banca Examinadora e aceito pelo curso de ENGENHARIA ELÉTRICA das FACULDADES DOCTUM DE CARATINGA, como requisito parcial da obtenção do título de

BACHAREL EM ENGENHARIA ELÉTRICA.

Caratinga 14/12/2018


GUILHERME CASSIMIRO DE ARAÚJO BORGES
Prof. Orientador


RICARDO BOTELHO CAMPOS
Prof. Avaliador 1


ROBSON DA SILVA
Prof. Examinador 2

Primeiramente, a Deus que nos criou e que através de seu folego de vida em mim está sendo o meu sustento para questionar a realidade e propor sempre um novo caminho a se seguir.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por esta conquista, pois foi através de suas mãos que hoje alcancei um dos meus objetivos.

Agradeço a minha família, minha mãe Creonice, meu Pai Manoel, minhas irmãs Crislanny e Franciele pelo apoio e incentivo nos momentos difíceis que passei.

Agradeço a minha namorada, Anália, por seu apoio e compreensão nos momentos em que não dispunha de tempo para ela.

Agradeço aos professores que compartilharam comigo os seus conhecimentos.

Ao professor Guilherme C. A. Borges cuja a orientação foi de grande importância para que eu alcançasse esse objetivo.

Agradeço pelas amizades que fiz nesses longos 5 anos que passei na faculdade. Devo um agradecimento especial a duas pessoas, Reinaldo e Willian, que estão me ajudando a superar minhas limitações.

Agradeço a todas as pessoas que de uma forma ou de outra torceram para que eu alcançasse este objetivo e hoje comemoram comigo esta etapa alcançada. O meu muito obrigado!

“Concentre todos os pensamentos na tarefa que está realizando. Os raios de sol não queimam até que sejam colocados em foco.”

(Alexander Graham Bell)

VIEIRA, Renato Florentino. **SISTEMA DE MONITORAMENTO DE TEMPERATURA DISTRIBUÍDA EM TRANSFORMADORES MONOFÁSICOS USANDO FIBRA ÓPTICA**. Caratinga, 2018. Trabalho de Conclusão de Curso Superior de Engenharia Elétrica - Curso de Engenharia Elétrica. Faculdades Doctum de Caratinga, Caratinga, 2018.

RESUMO

O sistema de monitoramento térmico em transformadores por meio da fibra óptica que possibilitou o avanço na tecnologia de sensoriamento aplicado em máquinas elétricas cuja operação é estática. Com os avanços dessa área de sensoriamento, máquinas como transformadores, são submetidas a testes a fim de determinar a temperatura distribuída do enrolamento do transformador de modo direto ultrapassando os métodos de medição indireta. A medição por sensor óptico em que a própria fibra é o sensor, possibilita uma melhor definição da temperatura no interior do transformador, podendo ser aplicada para medição de forma direta ou indireta. Em ambos os casos, a precisão é maior do que utilizando imagem térmica ou termopar. A simulação no software *every circuit* comprovou que houve alteração no comprimento da onda do sinal de origem emitido pela fonte de tensão ao passar por um ponto quente do transformador, caracterizando a perturbação que a temperatura causa em uma fibra óptica quando em contato direto ou indireto com uma grandeza a ser mensurada, nesse caso a temperatura. A fibra óptica pode ser utilizada para monitoramento térmico devido as suas vantagens em comparação com os métodos atuais, pois qualquer perturbação na sua intensidade de radiação, fase, comprimento da onda ou polarização permite que seja utilizada para medir a temperatura ou pressão.

Palavras-Chave: Sensor óptico. Sensibilidade térmica. Índice de refração. Índice em grau.

VIEIRA, Renato Florentino. **SISTEMA DE MONITORAMENTO DE TEMPERATURA DISTRIBUÍDA EM TRANSFORMADORES MONOFÁSICOS USANDO FIBRA ÓPTICA**. Caratinga, 2018. Trabalho de Conclusão de Curso Superior de Engenharia Elétrica - Curso de Engenharia Elétrica. Faculdades Doctum de Caratinga, Caratinga, 2018.

ABSTRACT

The thermal monitoring system in transformers using optics fiber allowed an advance of the technology of sensors applied in electric machines whose operation is static. With advances in this area of sensing, machines as transformers are subjected to tests to determine the distributed temperature of the winding of the transformer directly, surpassing the methods of indirect measurement. The measurement by optical sensor in which the fiber itself is the sensor allows a better definition of the temperature within the transformer and can be applied for measurement directly or indirectly. In both cases, the accuracy is higher than using thermal imaging or thermocouple. The simulation in the software of each circuit showed that it hears a change in the wavelength of the source signal emitted by the voltage source when passing through a hot spot of the transformer, characterizing the disturbance that the temperature causes in an optical fiber when directly or indirectly. counting on an amount to be measured. Optical fiber can be used for thermal monitoring because of its advantages compared to current methods, since any disturbance in the intensity of radiation, phase, wavelength or polarization allows it to be used for temperature or pressure measurement.

Key-words: Optical sensor. Thermal sensitivity. Refractive index. Step index.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Enrolamento tipo camada.....	18
Figura 2 – Enrolamento tipo disco (panqueca).....	19
Figura 3 – Sinais analógico e digital.....	28
Figura 4 – Diagrama de blocos de um sistema de comunicação óptica.....	29
Figura 5 – Índice de refração em degrau e índice gradual.....	30
Figura 6 – Espectro de uma rede de Bragg uniforme.....	32
Figura 7 – Ilustração de perfis de rede de Bragg de apodização.....	34
Figura 8 – Variação do índice de refração de uma rede aperiódica linear (em cima) e variação do período (abaixo).....	35
Figura 9 – Decaimento fluorescente com configuração Topo.....	38
Figura 10 – Decaimento fluorescente por configuração do Campo Evanescen- te.....	38
Figura 11 – Dispersão no interior da fibra.....	40
Figura 12 – Dipolo elétrico oscilante.....	42
Figura 13 – Representação da fonte óptica, transformador e osciloscópio.....	47
Figura 14 – Circuito equivalente do diagrama de bloco.....	48
Figura 15 – Sinal original após passar pelo transformador.....	49
Figura 16 – Sinais sendo gerados em função da temperatura.....	50

ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
cos	Coseno
FBG	<i>Fiber Bragg Grating</i>
LED's	<i>Light Emitting Diodes</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
NBR	Norma Brasileira
pu	Sistema por unidade
RFO	Rede de Fibra Óptica
RTDs	<i>Resistance Temperature Detectors</i>
SBS	<i>Stimulated Brillouin Scattering</i>
SI	Sistema Internacional
sin	Seno
SRS	<i>Spontaneous Raman Scattering</i>
tangh	Tangente Hiperbólica

LISTA DE CONSTANTES

n_{eff}	Índice de refração efetivo da fibra sem exposição
p_{11}	Componente do tensor fotoelástico
p_{12}	Componente do tensor fotoelástico
p_{ϵ}	Constante fotoelástica efetiva
S_{DL}	Sensibilidade à temperatura longitudinal
S_T	Sensibilidade à temperatura da fibra óptica de rede de Bragg
ν	Coefficiente de Poisson
α_{Λ}	Coefficiente de expansão térmica
α_n	Coefficiente termo-óptico
$\Delta\lambda_{Bragg}$	Varição do comprimento de onda de Bragg
ϵ_z	Elongação relativa segundo o eixo z
$FWHM$	Largura à meia altura
λ_{Bragg}	Comprimento de onda de Bragg
Λ	Período da perturbação induzida no índice de refração da fibra óptica de Bragg
Λ_0	Período à entrada da rede de fibra óptica de Bragg aperiódica
Λ_N	Coefficiente de ordem N do polinômio descritivo da variação do período da fibra óptica de Bragg
\overrightarrow{X}_0	Tensor suscetibilidade elétrica do meio
E_0	Vetor amplitude do campo elétrico
I_a	Intensidade da radiação
P	Polarização do meio
u	Deslocamento relativo à posição de equilíbrio dos centros atômicos
q	Vetor de onda dos centros atômicos
r	Vetor deslocamento
K	Vetor de onda

LISTA DE SÍMBOLOS

Ω	Ohm
Hz	Hertz
K	kilo
Km	Quilômetro
KVA	Kilovoltampère
L	Comprimento da rede de Bragg
m	Metro
mA	Miliampère
MVA	Megavoltampère
Ms	Milisseguno
V	Volts
T	Temperatura
ΔT	Varição da temperatura
ΔP	Varição mecânica
$^{\circ}\text{C}$	Grau Celsius
ω	Frequência angular de oscilação da onda eletromagnética

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	15
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	17
2.1 Transformador	17
2.2 Característica geral do transformador	18
2.2.1 Características construtivas	18
2.3 Ensaios	22
2.3.1 Ensaios a vazio	22
2.3.2 Ensaios de curto-circuito	23
2.3.3 Ensaios de aquecimento	23
2.3.3.1 <i>Elevação da temperatura do óleo.....</i>	<i>24</i>
2.3.3.2 <i>Elevação da temperatura no enrolamento.....</i>	<i>24</i>
2.4 Temperatura	24
2.4.1 Determinação do ponto mais quente em transformadores.....	25
2.4.2 Termômetros bimetálicos	25
2.4.3 Termômetro manométricos	25
2.4.4 Termômetros de resistência	26
2.4.5 Radiação térmica	26
2.4.6 Pirômetros	26
2.4.7 Modelos de termômetros de radiação encontrados no mercado.....	27
2.5 Fibra óptica	27
2.5.1 Comunicação via óptica	29
2.6 Sensores óptico.....	30
2.6.1 Sensores extrínsecos.....	31
2.6.1.1 <i>Método de rede de Bragg em fibra óptica</i>	<i>31</i>
2.6.1.2 <i>Classificação das redes de Bragg</i>	<i>32</i>
2.6.1.3 <i>Propriedades de uma rede de Bragg</i>	<i>32</i>
2.6.1.3.1 <u>Rede de Bragg uniforme</u>	<u>32</u>
2.6.1.3.2 <u>Redes de Bragg apodizadas</u>	<u>33</u>
2.6.1.3.3 <u>Redes de Bragg aperiódicas</u>	<u>34</u>
2.6.1.4 <i>Sensibilidade das redes de Bragg à temperatura.....</i>	<i>35</i>

2.6.1.5 Sensibilidade a deformação longitudinal	36
2.6.1.6 Método decaimento fluorescente	37
2.6.2 Sensores intrínsecos	38
2.6.2.1 Espalhamento Brillouin.....	39
2.6.2.2 Método Raman.....	40
2.6.2.3 Método Rayleigh	41
3 MONITORAMENTO TÉRMICO DO TRANSFORMADOR POR MEIO DA RFO ...	44
3.1 Monitoramento térmico do transformador	45
3.2 Representação do modelo térmico proposto	46
3.3 Representação do sinal óptico ao passar por um ponto quente do transformador.....	47
3.4 Resultado encontrado.....	51
4 CONCLUSÃO	52
4.1 TRABALHOS FUTUROS.....	53
5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	54

1 INTRODUÇÃO

Os avanços tecnológicos em sistemas de medição por óptica estão sendo empregados em vários segmentos do mercado e dentre os que estão em alta, podem-se destacar os sensores ópticos. As características básicas de um sensor óptico permite que seja aplicado em ambientes que causam grande interferência aos instrumentos de medições atuais e uma das aplicações mais recentes dos sensores ópticos está no monitoramento térmico distribuído de transformadores, utilizando a própria fibra óptica para medir a temperatura do enrolamento de modo direto.

Devido as características construtivas e funcionais do transformador é levantada as seguintes questões: como determinar a temperatura distribuída do enrolamento de forma a reduzir os danos causados pelo sobreaquecimento? É possível a utilização da fibra óptica como elemento sensor para monitorar a temperatura do transformador?

De modo a responder essas questões e com auxílio de um software, será analisado o que ocorre quando um sinal óptico passa por um ponto específico do transformador considerando os parâmetros do mesmo e da fibra óptica.

O objetivo da simulação é verificar se a fibra óptica é uma alternativa dentre os métodos atuais para monitorar a temperatura do transformador com maior ou menor eficiência e precisão.

As vantagens em utilizar a fibra óptica como instrumentos de medição está na imunidade a fatores externos como campo magnético e elétricos, alta taxa de transmissão, precisão nos valores mensurados e flexibilidade. Para medição de temperatura em transformadores a fibra óptica é um instrumento muito útil devido a essas vantagens, principalmente pela imunidade ao campo eletromagnético emitido pelo transformador.

A busca para melhorar a eficiência do transformador faz com que sejam pesquisadas novas técnicas que minimizam as perdas que ocorrem no processo de transmissão de energia. Visando a melhoria da máquina uma revisão bibliográfica foi feita de modo a compreender melhor suas características construtivas e funcionais, aplicando novas técnicas como sensores ópticos.

No âmbito da constante demanda de energia e a escassez dos recursos hídricos, várias formas de energia estão sendo estudadas para ajudar atender a grande demanda de energia. As diversas fontes de energia disponíveis para a

sociedade requerem tratamentos específicos, o que a torna do ponto de vista econômico uma energia mais cara, por esse ponto, pesquisas que buscam aumentar a eficiência dos equipamentos que convertem energia são constantemente desenvolvidas. Um dos equipamentos que estão presentes em vários pontos da cidade são os transformadores cuja eficiência pode chegar a 99%, porém ainda sofrem perdas por causa das propriedades dos materiais utilizados em sua construção. Uma das perdas que impacta diretamente na capacidade de transmissão e no tempo de vida útil da máquina está relacionada com sua temperatura interna.

Buscando solucionar esse problema, estudos de monitoramento térmico são desenvolvidos constantemente com o intuito de conseguir aumentar a eficiência e tempo de vida útil do transformador.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Transformador

A descoberta da energia elétrica é um grande marco na história, pois permitiu o desenvolvimento de novas tecnologias. Sabe-se que a energia não pode ser criada nem destruída, mas pode ser transformada em outra forma de energia. Dentre as várias formas de energia encontradas na natureza, as mais exploradas são: elétrica, potencial gravitacional, calor, radiação e nuclear. Dentre essas energias citadas, a energia elétrica é a mais consumida pela sociedade e para que se tenha essa energia é necessário transformar outras formas de energia em energia elétrica (SOUZA, V. R., 2015).

A maior parte da energia elétrica gerada no Brasil é de origem das hidrelétricas e são transmitidas por linhas de transmissões até os centros de consumos. No percurso compreendido entre a geração e distribuição, a energia passa por subestações abaixadora/elevadora a fim de que seja disponibilizada uma energia dentro dos padrões necessários para o consumo. Devido a fatores socioambientais, as usinas hidrelétricas são construídas longe dos centros consumidores dificultando a transmissão da energia, porém esse problema foi superado quando Michael Faraday, em 1831, inventou o transformador, o que permitiu transmitir energia elétrica ou potência elétrica através de um circuito a outro por meio de indução de acordo com os princípios do eletromagnetismo fazendo com que seja transmitida a longas distâncias (REIS, J. B. A., 2006).

O transformador é um equipamento de grande importância no sistema de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica, e uma das questões enfrentadas pelas empresas é manter o condicionamento térmico desse equipamento dentro dos limites de operação aceitáveis, permitindo que o equipamento desempenhe com a máxima eficiência sua operação (BARROS, 2007).

Nesse contexto, a confecção de um projeto de transformador deve ser definida suas características nominais e sua aplicação a fim de evitar problemas posteriores devido ao mal dimensionamento de suas características construtivas e funcionais e sua aplicação no sistema elétrico.

2.2 Característica geral do transformador

De forma simplificada, um transformador é formado por dois enrolamentos: um primário e um secundário. O lado onde está o enrolamento primário é conectado à rede que está fornecendo a energia ao equipamento, enquanto o lado onde está o enrolamento secundário irá fornecer a energia induzida que alimenta o bloco de carga que esteja conectado à rede de transmissão ou distribuição (PULIDO, 2009).

2.2.1 Características construtivas

Suas características construtivas dependem do tipo de carga a ser alimentada, sendo que a fabricação do transformador começa com a construção do núcleo, nesse caso, o rolo de ferro é fatiado e empilhado formando o núcleo do transformador e em seguida o fio de cobre é utilizado para fazer no enrolamento primário dos transformadores de distribuição e de força, sendo que a seção do fio do enrolamento primário é circular, enquanto que no enrolamento secundário, o cobre é de seção retangular podendo variar de um fabricante para outro. A forma em que o enrolamento é executado pode assumir dois modos sendo-os (FILHO, 2015):

- a) tipo camada – os fios são enrolados de forma helicoidal em espiras sucessivas conforme ilustrado na figura 1 representado um transformador com três bobinas;

Figura 1: Enrolamento tipo camada



Fonte: AZEVEDO; TAVARES (2011)

- b) tipo disco (panqueca) – enrolados em várias seções ou pequenas espiras de forma helicoidal com espiras sucessivas e adjacentes, ou seja, cada disco é separado entre si.

Figura 2: Enrolamento tipo disco (panqueca)



Fonte: AZEVEDO; TAVARES (2011)

Quanto ao número de fases podem ser:

- a) transformadores monobuchas;
- b) transformadores bifásicos;
- c) transformadores trifásicos.

Quanto ao tipo de ligação:

- a) estrela;
- b) triângulo.

Quanto ao meio isolante:

- a) líquido isolante;
- b) a seco;
- c) encapsulamento reforçado;
- d) encapsulamento sob vácuo.

O transformador é definido por Oliva (2010), como equipamento cuja a operação é estática, utilizado para transmitir por meio de campo eletromagnético a energia de um circuito a outro por indução. É empregado na geração, transmissão e distribuição de energia elétrica. Nesse contexto, a aplicação do transformador desde a geração, onde a tensão gerada é elevada para níveis adequados para a transmissão, no qual permite a transmissão de potência de forma mais econômica até os pontos de consumo. Com isso, é possível que seja entregue tensões/correntes com níveis de segurança adequados para o usuário do sistema elétrico. Devido as particularidades desse equipamento em obter determinadas variações no nível de tensão e corrente, passa a ser muito usado em vários setores do sistema elétrico.

Para Simone (2010), o transformador é um equipamento que transfere a energia elétrica de um circuito a outro por indução ou acoplamento magnético, permitindo que a energia seja transferida de forma mais econômica, além de destacar três funções importantes desse equipamento, sendo essas:

- a) variação do nível de tensão e corrente sem alteração na frequência fundamental;
- b) casamento de impedâncias;
- c) isolamento elétrica de dois ou mais estágios em planta elétrica.

A forma em que os enrolamentos primários e secundários do transformador estão enrolados ao núcleo, irá indicar se o transformador está fortemente acoplado ou frouxamente acoplado, nesse último caso, considerando que o núcleo é de ar. As especificações de um transformador podem ser encontradas na placa de identificação, nas quais encontra as principais especificações:

- a) potência aparente (KVA ou MVA);

A potência aparente nominal e a tensão nominal têm como objetivo limitar o fluxo de corrente que circula no enrolamento do transformador. Controlando a corrente que circula no transformador é possível controlar as perdas do equipamento, ou seja, controla o sobreaquecimento das bobinas do transformador (CHAPMAN, 2013).

De forma geral, controlando a corrente nominal que está circulando no enrolamento do transformador, irá evitar o sobreaquecimento dos enrolamentos minimizando as perdas por efeito Joule.

A definição de potência aparente no transformador independe de sua fase em relação à tensão de terminal, ou seja, o mesmo aquecimento ocorre a um dado valor de corrente, independentemente se é potência aparente, ativa ou reativa.

b) tensão primária, secundária e frequência (V e Hz);

A tensão nominal do transformador serve de dois parâmetros. A primeira é de proteger a isolação contra uma ruptura por excesso indevido da tensão. A segunda está relacionada como a curva de magnetização e a corrente de magnetização do transformador (CHAPMAN, 2013).

Quando a tensão aplicada é aumentada, o fluxo máximo também será aumentado até um certo ponto. Em um determinado ponto da curva de magnetização, será necessário aumentar a corrente de magnetização acima do valor de aumento feito no fluxo de magnetização. Com a elevação da tensão, e por consequência elevação da corrente de magnetização, tornam-se inaceitáveis.

Pode-se concluir que, a tensão nominal é definida pela corrente de magnetização máxima aceitável pelo núcleo do transformador, por exemplo, um transformador operando com frequência de 60Hz e em um determinado ponto sua frequência de operação é reduzida para 50Hz, com isso, a tensão aplicada no primário deverá ser reduzida em 1/6 ou fluxo de pico do núcleo será elevado a valores extremamente altos. A redução conjunta da tensão aplicada e a frequência é denominada por Chapman (2013), como redução da tensão nominal.

c) resistência e reatância em série por unidade.

As transformações das unidades para cálculos de transformadores podem ser trabalhosas, e devido a isso utiliza-se o sistema por unidade (pu) como método para simplificar os cálculos.

Segundo Umans (2014), por esse método independentemente do tamanho do transformador suas impedâncias iram variar. Com isso, a reatância de um circuito primário de $0,1 \Omega$ para um transformador pode ter valores elevados para um dado

transformador ou um valor insignificante para outro, dependendo apenas dos valores nominais dos equipamentos analisados.

Com a utilização do pu, as unidades de tensão, corrente, potência, impedância e outras grandezas elétricas passam a ter suas unidades de medidas representadas em pu, facilitando nas transformações das unidades.

Dispensando nos cálculos as conversões dos níveis de tensões dos transformadores que são necessárias nas resoluções dos cálculos matemáticos diminuindo os erros nas transformações, ou seja, todas as unidades de medidas são representadas por uma única unidade, o pu.

2.3 Ensaio

Os ensaios nos transformadores permitem determinar alguns parâmetros funcionais e construtivos, levando em consideração os dados da placa do transformador, os equipamentos adequados a serem utilizados durante os ensaios e o local. Considerando esses critérios, é possível preparar o equipamento para que seja feito os ensaios a vazio e a plena carga (OLIVEIRA; ABREU; COCO,1984).

2.3.1 Ensaio a vazio

Para execução do ensaio a vazio, considera na maioria dos transformadores de potência e distribuição utilizar o enrolamento que possui o menor número de espiras, isso segundo Kosow (1995), por questões de segurança na qual através desse ensaio é possível determinar as perdas:

- a) perdas no núcleo ou perdas por histerese e Foucault;
- b) corrente de magnetização;
- c) relação de transformação;
- d) parâmetros do ramo magnetizante, bem com a forma não-senoidal da corrente a vazio e a corrente transitória de magnetização.

2.3.2 Ensaio de curto-circuito

De acordo com Fitzgerald, Júnior e Umans (2006), o ensaio de um curto-circuito tem como objetivo encontrar as impedâncias equivalentes em série as quais podem-se determinar:

- a) perdas no cobre;
- b) queda de tensão interna;
- c) impedância;
- d) resistência;
- e) reatância percentual.

2.3.3 Ensaio de aquecimento

Os ensaios têm como objetivo determinar parâmetros operacionais e o de elevação de temperatura não foge desta premissa. O sobreaquecimento no transformador causa danos em vários componentes do equipamento e o ensaio de elevação de temperatura permite determinar as temperaturas limites para o perfeito funcionamento do equipamento sem que seja prejudicada suas capacidades de transferência de energia.

De acordo com a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT, 1993), pela norma Norma Brasileira (NBR-5380), são recomendados quatro processos que permitem determinar a elevação da temperatura pelos seguintes métodos:

- a) método da carga efetiva;
- b) método da oposição;
- c) método do circuito aberto;
- d) método do curto-circuito.

O ensaio de elevação de temperatura é efetuado em duas etapas, sendo essas: elevação da temperatura do óleo e a do enrolamento.

2.3.3.1 *Elevação da temperatura do óleo*

A energia dissipada no enrolamento devido ao efeito Joule e no núcleo por histerese e Foucault, faz com que o óleo do transformador aqueça. Sob o ponto de vista de distribuição térmica do transformador, a temperatura não está uniformemente distribuída devido ao fato de que as perdas estão concentradas apenas nos enrolamentos (OLIVEIRA; COCO; ABREU, 1984).

2.3.3.2 *Elevação da temperatura no enrolamento*

De acordo com Oliveira, Coco e Abreu (1984), a temperatura nos transformadores é representada pela média entre os condutores das bobinas. Isso ocorre porque a temperatura nos conectores das bobinas está conectada internamente fazendo com que haja uma diferença de temperatura no seu interior, ou seja, os conectores internos possuem temperatura maior que o externo.

Devido à dificuldade em medir a temperatura de forma direta, é utilizado um método indireto como a variação da resistência do condutor devido a alternância da temperatura.

Pelo método indireto de variação da resistência, mede-se a temperatura do enrolamento a temperatura ambiente, e após ter atingido o equilíbrio térmico é ligado em curto fazendo percorrer uma corrente nominal por um dado tempo. Decorrido o tempo, desliga-se o transformador e mede a resistência do enrolamento à quente, aplicando uma tensão contínua no enrolamento com o objetivo de evitar o efeito de reatância indutiva.

A tensão aplicada deve ter um valor consideravelmente alto para saturar o circuito magnético dos enrolamentos. Nesse caso, a bobina se comporta como uma bobina com núcleo de ferro saturado, ou seja, um circuito ôhmico sem auto-indução (OLIVEIRA; COCO; ABREU, 1984).

2.4 **Temperatura**

Desde a invenção do termômetro no início do século XVII, por Galileu, vem sendo desenvolvidos instrumentos que aprimoram as medições de temperatura. Esses instrumentos são divididos em duas classes: a primeira classe o instrumento

deve estar em contato com o meio a se medir, enquanto que a segunda classe são instrumentos que não necessitam ter contato com o meio que se deseja medir a temperatura (FILHO, J. S., 2016).

2.4.1 Determinação do ponto mais quente em transformadores

Como descrito nos itens anteriores, os transformadores são equipamentos construídos para transferir energia de um circuito a outro por meio de indução magnética, e devido a importância desse equipamento no sistema de transmissão de energia, seu funcionamento deve apresentar confiabilidade.

Por sua pertinência na rede elétrica, ter conhecimento dos níveis de temperatura nos quais os enrolamentos estão submetidos não é uma tarefa fácil, pois, os métodos atuais de medição por imagem térmica não fornecem valores precisos de temperatura.

Outra forma de se obter a temperatura no interior do enrolamento é pelo método de medição indireta no qual fornece valores melhores, porém, não há detalhamento do processo que ocorre no interior do transformador, nesse caso, essa condição é ideal para determinar a condição de aquecimento do transformador (SILVA, J. R., 2015).

2.4.2 Termômetros bimetálicos

Esse termômetro utiliza de duas partes metálicas com um coeficiente de dilatação térmica diferente, e quando é exposto a uma temperatura, essas partes metálicas dilatam, porém, como elas têm coeficientes diferentes uma irá dilatar mais que a outra. Esse modelo de termômetro possui poucas partes móveis sendo indicado para medições entre 0 a 400°C (SOLÉ, 2011).

2.4.3 Termômetro manométricos

Qualquer propriedade física que seja capaz de variar com a temperatura pode ser utilizada como termômetro. Os termômetros manométricos são os equipamentos mais utilizados para medirem a temperatura pela variação da pressão de um gás ou

vapor. De modo geral, quando a temperatura aumenta a pressão do gás aumenta linearmente (KNIGHT, 2009).

2.4.4 Termômetros de resistência

Denominadas *Resistance Temperature Detectors* (RTDs), os termômetros de resistência baseiam-se na variação da resistência elétrica do material, ou seja, a resistência do material aumenta de forma linear com a temperatura. Geralmente, na construção dos termômetros de resistências é utilizado um fio de platina como elemento sensível a temperatura, bateria, galvanômetro configurado em um circuito da ponte de Wheatstone que vai medir à pequenas variações da resistência (MILLER et al, 2018).

2.4.5 Radiação térmica

De acordo com Balbinot e Brusamarello (2010), “toda carga em movimento está associada a um campo elétrico variável, o qual, por sua vez, produz um campo magnético variável”, ou seja, qualquer corpo irá emitir um campo eletromagnético, denominado radiação térmica, e através da radiação que o corpo está emitindo é possível medir a temperatura dele. Isso é possível medindo a intensidade da radiação ou através do espectro de frequência (BALBINOT; BRUSAMARELLO, 2010, p.306).

Assim conclui-se que qualquer corpo é uma fonte de energia eletromagnética que por sua vez torna-se possível medir a radiação térmica emitida por ele, ou seja, sua temperatura.

2.4.6 Pirômetros

Utilizados para medir a temperatura através da radiação térmica emitida pelo objeto analisado, os pirômetros são instrumentos que possuem uma grande vantagem em comparação com os demais medidores. A medição de temperatura por meio desse instrumento ocorre de forma indireta, sem contato físico com o objeto. A radiação térmica formada pela luz visível, infravermelha e ultravioleta, e suas cores e intensidades representaram os indicadores da temperatura do objeto (ROLLE, 2006).

2.4.7 Modelos de termômetros de radiação encontrados no mercado

Na sua forma construtiva básica, os termômetros de radiação constituem de um sistema óptico que funciona como um meio de redirecionar a energia que o objeto está emitindo, um detector para converter a energia emitida pelo objeto em sinal elétrico, um ajuste de emissividade e por fim, um circuito que permite fazer o ajuste de compensação de temperatura, isso para que não ocorra erros na medição devido a variação no interior do instrumento (BALBINOT; BRUSAMARELLO, 2010).

Os mais encontrados no mercado são:

- a) termômetro de Radiação de Banda Larga;
- b) termômetro de Radiação de Banda Estreita;
- c) termômetro de Radiação de Duas Cores;
- d) pirômetros Ópticos.

2.5 Fibra óptica

A Rede de Fibra Óptica (RFO) de modo geral se dividem em três regiões, sendo:

- a) núcleo;
- b) casca;
- c) revestimento.

Em meio a necessidade de se obter sensores mais eficientes e com menores perdas, as fibras ópticas tornou-se um meio pelo qual possibilitou implementação na indústria optoeletrônica dos sensores ópticos (CUNHA, 2007).

As vantagens na utilização da fibra óptica são:

- a) insensibilidade – a interferências eletromagnéticas;
- b) não conduz corrente elétrica;
- c) não precisa estar perto do alvo a ser medido;
- d) capacidade para medidas intrínsecas;
- e) imune a corrosão;

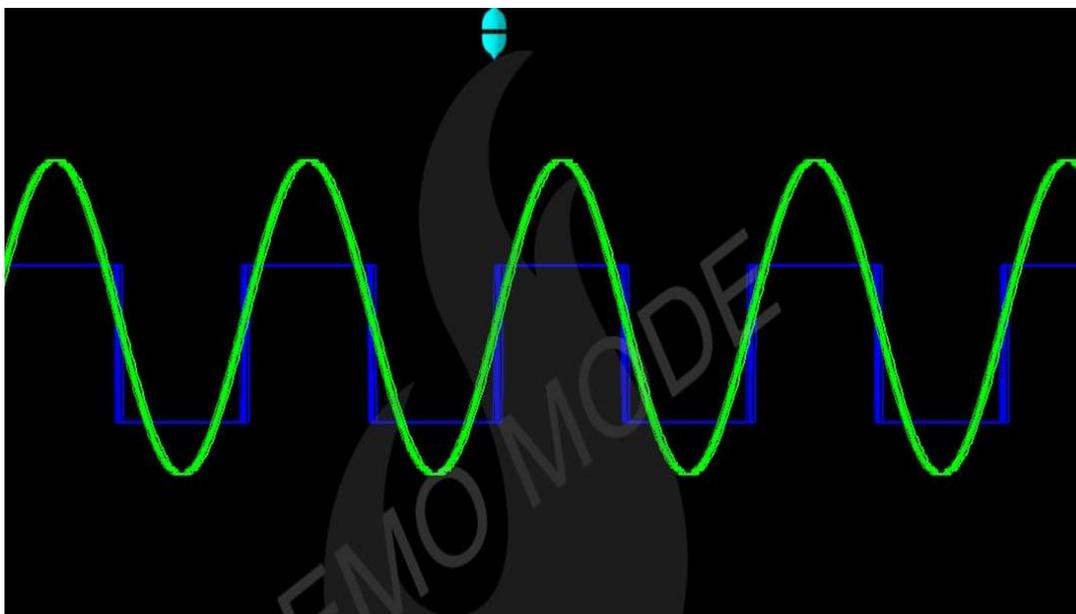
f) flexibilidade mecânica e etc.

A fibra óptica pode ser utilizada em sistema de transmissão de sinais analógicos, digitais ou sensoriamento. Nesse último, com a necessidade de se obter sensores mais eficientes e com menores perdas, as fibras ópticas tornaram-se um meio pelo qual possibilitou a implementação na indústria optoeletrônica dos sensores ópticos.

Para Ruschel (1996), qualquer sistema de comunicação que deseja ser transmitida é convertido em um sinal elétrico que assume a forma analógica ou digital. Na comunicação analógica o sinal é transmitido por um sinal denominado portadora, na qual é variável de acordo com o sinal da informação que está sendo transmitido, e o sinal digital é transmitido através de sinais elétricos, ou seja, valores lógicos 1 e 0.

Em um sinal analógico a forma de onda tem formato senoidal, em contrapartida, o sinal digital pode assumir apenas dois valores sendo, 1 para ligado (alto) e 0 para desligado (baixo), como pode ser visto na figura 3.

Figura 3: Sinais analógico e digital



Fonte: Autor (2018)

A forma de onda senoidal em verde representa o sinal analógico variável no tempo, e em azul a onda quadrada característica de um sinal digital.

Para Forouzan (2009), seja o sinal analógico ou digital, a largura de banda é caracterizada pelo conteúdo espectral do sinal que representa a faixa de frequência contidas no sinal, ou seja, a diferença entre a maior e menor frequência contida no sinal e pode ser representada matematicamente por uma transformada de Fourier do sinal.

A largura de banda representa a capacidade que uma conexão ou rede tem de transmitir um sinal, determinando qual a velocidade que essa conexão ou rede suporta na transmissão dos dados.

2.5.1 Comunicação via óptica

Com os avanços nos sistemas de comunicação, as fibras ópticas passaram a ser empregadas em vários seguimentos da comunicação, devido a sua capacidade de transmitir sinais a uma velocidade muito elevada, podendo chegar a um fator de transmissão de até 10.000 comparado com o sistema de microondas, isso pelo fato de que a frequência portadora da onda luminosa é muito elevada (GOVIND, 2010).

A figura 4 representa a forma genérica de um sistema de comunicação por meio de fibra óptica, no qual, o transmissor óptico, canal de comunicação e receptor óptico são comuns em todos os sistemas que utiliza comunicação óptica para a transmissão de sinais.

Figura 4: Diagrama de blocos de um sistema de comunicação óptica



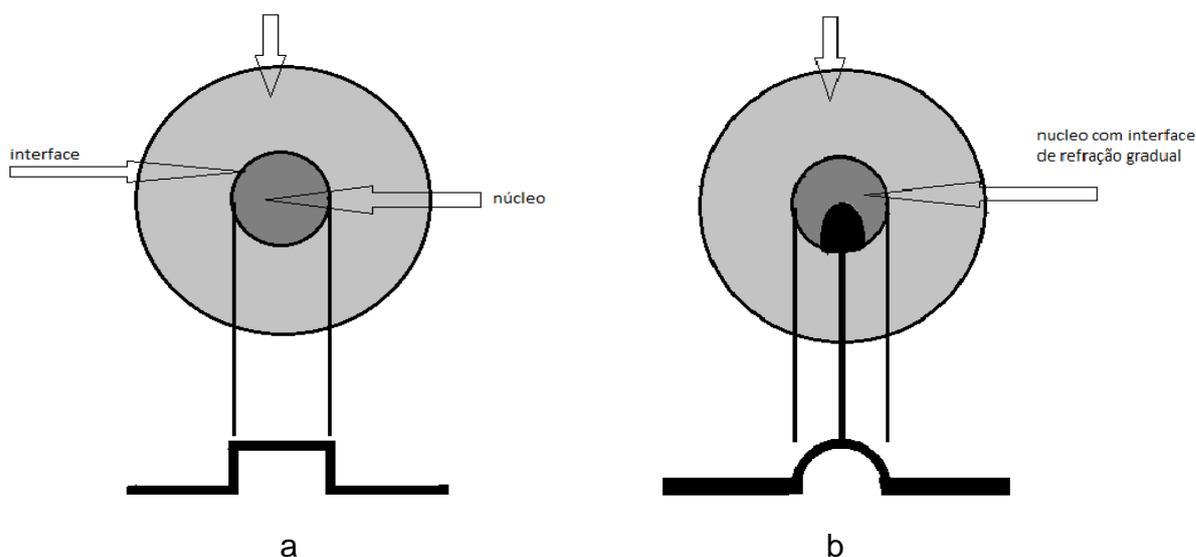
Fonte: Autor (2018)

Geralmente, a comunicação via óptica acontece de dois modos, seja ela via espaço livre ou espaço guiado. No espaço livre o sistema precisa ter um alinhamento perfeito entre o transmissor e receptor, e no espaço guiado a comunicação acontece por meio da fibra óptica.

Em sua forma mais simples, uma fibra óptica consiste em um núcleo cilíndrico de vidro de sílica envolvido por uma casca com índice de refração menor. Devido à brusca mudança de índice de refração na interface núcleo-casca, essas fibras são denominadas *fibras de índice em degrau (step-index fibers)*. Em um tipo diferente de fibra, conhecido como *fibra de índice gradual (graded-index fiber)*, o índice de refração diminui gradualmente no interior do núcleo (GOVIND, 2010, p.29).

A figura 5 (a) representa uma fibra de índice em degrau em que o “índice de refração, que varia de acordo com a seção transversal do cabo”, e a figura 5 (b) “refere aos vários caminhos que os raios de luz podem tomar ao passar através da fibra”, ou seja, no índice em degrau é formado um degrau bem definido entre o núcleo e a casca, considerando que, o núcleo e a casca tem índices de refração constantes e diferentes entre si (JÚNIOR, 2013, p.202 - 203). Enquanto no índice de refração gradual, varia gradativamente de forma suave e contínua considerando o diâmetro do núcleo.

Figura 5: Índice de refração em degrau e índice gradual



Fonte: Autor (2018)

2.6 Sensores óptico

Na aplicação do sensor óptico para monitoramento térmico, se a grandeza a ser medida (temperatura) causar alguma influência nas propriedades físicas da fibra, a radiação da fibra sofrerá modificações, permitindo através de critérios específicos

determinar o valor da grandeza física medida. As propriedades da fibra que devem sofrer modificação são (BALBINOT; BRUSAMARELLO, 2010):

- a) intensidade da radiação;
- b) na fase;
- c) comprimento da onda;
- d) polarização.

Basicamente existem quatro técnicas que podem ser aplicadas com a fibra óptica como elemento sensor na aplicação de monitoramento distribuído de temperatura:

- a) sensores ópticos – extrínsecos e intrínsecos;
- b) sensor localizado na fibra – a própria fibra é o elemento sensor (da ordem de centímetros);
- c) sensor quase-distribuído – limitação de locais da fibra que atuará como sensor (da ordem de metros);
- d) sensores distribuídos – a fibra na sua totalidade será o elemento sensor.

2.6.1 Sensores extrínsecos

Das inúmeras aplicações dos sensores extrínsecos, a de monitoramento de temperatura dos enrolamentos dos transformadores vem sendo muito empregada por serem “caracterizados pelo fato do mensurando atuar numa região externa à fibra óptica, isto é, a fibra óptica é usada apenas como canal óptico de transporte da radiação ao local de monitoração” (CUNHA, 2007, p.19).

Nesse contexto, a fibra atua como guia da luz até o ponto sensor de onde sai da fibra para ser modulada em um dispositivo separado.

2.6.1.1 Método de rede de Bragg em fibra óptica

A Rede de Bragg em Fibra (*Fiber Bragg Grating*) ou simplesmente FBG, é segundo Souza (2011), em sua forma mais simples, constituída de uma modulação periódica do índice de refração no núcleo de uma fibra.

Há dificuldade em modelar uma única teoria que descreve todos os fenômenos ligados a fotossensibilidade das fibras ópticas. Isso ocorre devido ao grande número de parâmetros físicos que sofrem alteração na exposição luminosa da fibra, não limitando as alterações no índice de refração, mas também no coeficiente térmico entre outros (NOGUEIRA, 2005).

2.6.1.2 Classificação das redes de Bragg

As redes de Bragg podem ser classificadas em quatro tipos, sendo esses: tipo I, tipo IA, tipo IIA e tipo II (HILL et al, 1978).

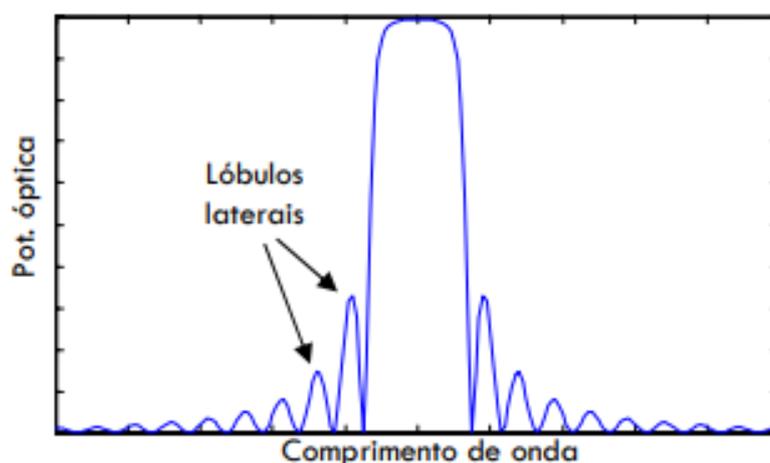
Segundo Figueiredo (2009), uma perturbação periódica longitudinal ocorrida no interior da fibra óptica é causada pelo índice de refração do núcleo de uma fibra. A elevada flexibilidade dos parâmetros com que pode ser desenhada, é considerada uma grande vantagem da rede de Bragg, além de ter inúmeros aplicações.

2.6.1.3 Propriedades de uma rede de Bragg

2.6.1.3.1 Rede de Bragg uniforme

As propriedades espaciais de uma rede uniforme mantêm-se constante ao longo da extensão longitudinal e com o índice de refração a variar uniformemente e periodicamente como pode ser visto na figura 6.

Figura 6: Espectro de uma rede de Bragg uniforme



Fonte: NOGUEIRA (2005)

Nesse modelo de rede é possível controlar a reflexividade e a largura de banda, para isso, é necessário que seja controlado a amplitude de modulação e do comprimento da rede (FIGUEIREDO, 2009).

A simplicidade de gravação nessa rede é caracterizada como uma grande vantagem, porém, surgem lóbulos laterais com grandes amplitudes devido as fronteiras abruptas da rede de Bragg pelo efeito de cavidade Fabry - Perot.

2.6.1.3.2 Redes de Bragg apodizadas

A apodização é uma técnica utilizada para reduzir os lóbulos laterais das redes uniformes, ou seja, o índice de refração iniciar e terminar de forma gradual (HILL et al, 1978).

Os perfis de apodização matemáticos são os seguintes:

Perfil tangente hiperbólica:

$$A(z) = \frac{\tanh\left\{P\left[1-2\left|\frac{z-L/2}{L}\right|\right]\right\}}{\tanh(P)} \quad (1)$$

Perfil seno:

$$A(z) = \sin\left(\frac{\pi z}{L}\right) \quad (2)$$

Perfil coseno elevador:

$$A(z) = \frac{1}{2}\left[1 + \cos\left(\frac{\pi(z-L/2)}{FWHM}\right)\right] \quad (3)$$

Perfil Blackman:

$$A(z) = \frac{1+(1+P)\cos\left(\frac{2\pi(z-L/2)}{L}\right)+P\cos\left(\frac{4\pi(z-L/2)}{L}\right)}{2(1+P)} \quad (4)$$

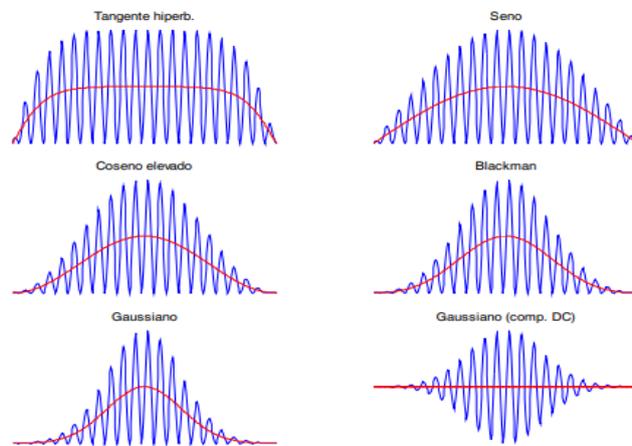
Perfil gaussiano de ordem elevada:

$$A(z) = \exp \left\{ - \left[2(\ln 2)^{1/P} \left(\frac{z-L/2}{FWHM} \right) \right]^P \right\} \quad (5)$$

Onde, L é o comprimento da rede, P o parâmetro de ajuste de acordo com o perfil escolhido, $FWHM$ é a largura à meia altura do perfil de apodização. Essa técnica é resultado da variação da amplitude do coeficiente de modulação do índice de refração ao longo da extensão da rede (MATIAS, 2014).

A figura 7 ilustra os perfis citados acima.

Figura 7: Ilustração de perfis de rede de Bragg de apodização



Fonte: NOGUEIRA (2005)

A forma mais simples de gravar uma rede apodização está em controlar o tempo de exposição em cada zona da rede.

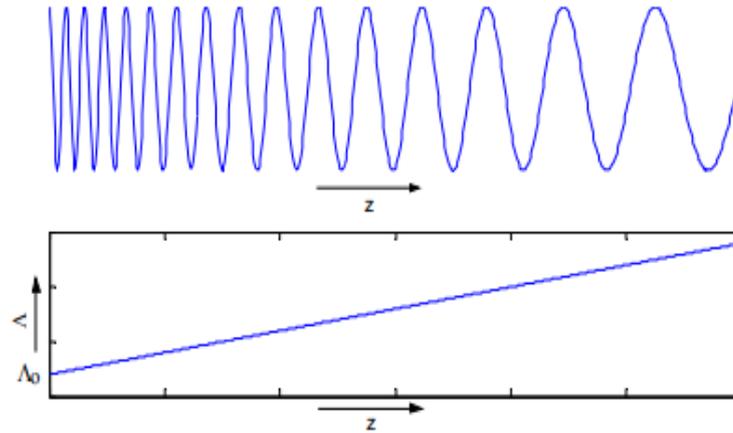
2.6.1.3.3 Redes de Bragg aperiódicas

A ressonância do sinal varia ao longo de sua extensão longitudinal, tendo efeito tanto na largura de banda quanto no atraso de grupo. Matematicamente uma rede aperiódica pode ser expressada pela equação de polinômio de grau N sendo (NOGUEIRA, 2005):

$$\Lambda(z) = \Lambda_0 + \Lambda_1 z + \Lambda_2 z^2 + \Lambda_3 z^3 \dots + \Lambda_N z^N \quad (6)$$

Onde, Λ_0 é o período de entrada da rede, podendo ser visualizado na figura 8.

Figura 8: Variação do índice de refração de uma rede aperiódica linear (em cima) e variação do período (abaixo)



Fonte: NOGUREIRA (2005)

Com isso, esse modelo de rede permite compensar a dispersão através da variação progressiva da banda proibida.

2.6.1.4 Sensibilidade das redes de Bragg à temperatura

Para a correta aplicação da rede de Bragg, é crucial ter conhecimento de suas propriedades espectrais e das perturbações externas, sendo que qualquer perturbação externa poderá alterar o índice de refração da fibra.

Se desconsiderarmos as perturbações mecânicas ($\Delta P = 0$) em uma rede de Bragg, o comprimento da onda da rede pode variar em função da temperatura sendo matematicamente definido como:

$$\Delta\lambda_{Bragg} = S_T\Delta T \quad (7)$$

Sendo:

$$S_T = \lambda_{Bragg}(\alpha_\Lambda + \alpha_n) \quad (8)$$

A sensibilidade à temperatura da rede:

$$\alpha_{\Lambda} = \frac{1}{\Lambda} \left(\frac{\partial \Lambda}{\partial T} \right) \quad (9)$$

Sendo α_{Λ} o coeficiente de expansão térmico com valor para a sílica de $\alpha_{\Lambda} \approx 0.55 \times 10^{-6} K^{-1}$ e:

$$\alpha_n = \frac{1}{n_{eff}} \left(\frac{\partial n_{eff}}{\partial T} \right) \quad (10)$$

sendo α_n o coeficiente termo-óptico com valor aproximado de $\alpha_n \approx 8.6 \times 10^{-6} K^{-1}$ para a fibra de sílica dopada com germânio, observa-se que os valores dos coeficientes contribuem de forma significativa para a sensibilidade térmica da rede de Bragg quando a variação do índice de refração é por meio da temperatura, ou seja, é a razão entre a variação do comprimento de onda da rede de Bragg e a variação da temperatura na rede (OLIVEIRA, V., 2012).

2.6.1.5 Sensibilidade a deformação longitudinal

O índice de refração efetivo é influenciado pelas variações térmicas ou deformações mecânicas causando variação do espectro de reflexão da rede de Bragg, possibilitando que a fibra seja utilizada como sensor de deformação e temperatura. A expressão matemática quando considerado a deformação a temperatura constante pode ser expressada como:

$$\Delta \lambda_{Bragg} = S_{DL} \varepsilon_z \quad (11)$$

Sendo S_{DL} a sensibilidade a deformação longitudinal, ε_z a elongação relativa de acordo com o eixo z da fibra, a sensibilidade da fibra pode ser representada pela equação:

$$S_{DL} = \lambda_{Bragg} (1 - p_{\varepsilon}) \quad (12)$$

Onde p_{ε} é a constante fotoelástica efetiva, sendo representada por:

$$p_{\varepsilon} = \frac{n_{eff}^2}{2} [p_{12} - \nu(p_{11} + p_{12})] \quad (13)$$

Sendo as variáveis p_{11} e p_{12} as componentes do tensor fotoelástico e ν o coeficiente de Poisson da fibra (OLIVEIRA, F. M. D. R., 2013).

2.6.1.6 Método decaimento fluorescente

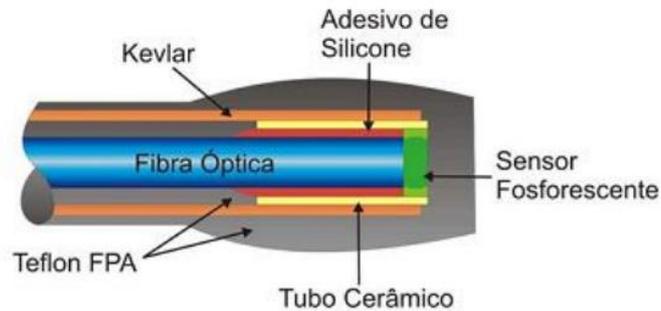
Ao tratar de fenômenos ópticos, duas categorias devem ser compreendidas: a luminescência e a fosforescência. A luminescência é, de modo simplificado, a radiação que uma substância emite quando um elétron passa do estado excitado para o estado fundamental. Enquanto que a fosforescência representa o tempo que o elétron gasta para que seja feita essa transição de estado (FARIA, 2012).

O princípio de decaimento da fluorescência da luz ocorre quando um pulso de luz incide em um material fosforescente, com isso, o decaimento ocorre de forma proporcional a temperatura na qual o sensor esteja inserido, ou seja, o pulso de luz emitido pela fonte óptica emite uma radiação luminosa que sofre um decaimento em função da temperatura do meio. Esse método não requer calibração, já que o sensor não sofre alteração física com tempo (DIAS et al, 2012).

Desta forma é possível mensurar a temperatura baseado na variação do decaimento. Os sensores baseados na fluorescência podem ser utilizados quando ocorre uma variação na intensidade de luz, tempo de vida do estado excitado ou pela polarização da emissão óptica (FARIA, 2012).

Os sensores embasados na fluorescência são encontrados com os mais variáveis tipos de materiais emissores de luz, sendo que as configurações do elemento sensor mais encontrados são:

- a) configuração Topo – nesse caso o sensor é fixado na extremidade da fibra como pode ser visto na figura 9.

Figura 9: Decaimento fluorescente com configuração Topo

Fonte: FARIA (2012)

Nesse modelo de configuração a fibra óptica atua apenas como elemento condutor do feixe de luz.

- b) configuração do Campo Evanescente – nessa configuração a fibra é tanto o guia do feixe de luz quanto o elemento transdutor, pois uma parte do revestimento é condicionado a tornar-se um elemento sensor, como demonstra a figura 10.

Figura 10: Decaimento fluorescente por configuração do Campo Evanescente

Fonte: FARIA (2012)

Com essa configuração é possível o sensor ser inserido ao longo da fibra, permitindo que esta seja utilizada como um sensor de detecção distribuído.

2.6.2 Sensores intrínsecos

Conforme Cunha (2007), os sensores intrínsecos o “mensurando atua diretamente na fibra, alterando uma ou mais propriedades ópticas da radiação guiada”, ou seja, nesse caso a fibra óptica atua sendo o próprio sensor. Com isso, a

luz permanece sendo guiada dentro da fibra enquanto é modulada em resposta a grandeza física a ser medida (CUNHA, 2007, p.20).

Os avanços da tecnologia em sensoriamento distribuído utilizando sensores a fibra óptica intrínsecos, possibilitaram desenvolver novos sensores, onde a própria fibra pode ser o elemento sensor.

Nos sensores a fibra óptica, a modulação do campo óptico induzida pela variável a ser medida é mensurada enquanto a luz é guiada no interior da fibra óptica. Os sinais processados em diferentes pontos da fibra permitem determinar a grandeza física ao longo da mesma. Estes sensores distribuídos intrínsecos possibilitaram que a grandeza física possa ser monitorada em um grande número de pontos, ou de forma contínua ao longo da própria fibra (ROSSETTO, 2000).

Basicamente, existem três técnicas de implementar os sensores ópticos, sendo: sensores localizados na fibra, sensores quase-distribuídos e sensores distribuídos. De acordo com o referencial teórico, esses sensores podem ser na ordem de centímetros, metros ou quilômetros, dependendo dos métodos a serem utilizados.

2.6.2.1 Espalhamento Brillouin

Atualmente, existem dois efeitos ópticos não-lineares que ocorrem em fibra ópticas que estão sendo estudados, buscando uma aplicação em sistemas que necessitam de monitoramentos de grandezas físicas, como temperatura e deformação mecânica distribuídos em toda a extensão da fibra óptica usando-a como elemento sensor.

Segundo Rossetto (2000), o efeito Raman espontâneo (*Spontaneous Raman Scattering*, SRS), é aplicado no monitoramento distribuído de temperatura, no qual é possível obter 0,5°C em resolução de temperatura com resolução entre pontos sensores de 1m ao longo da fibra para comprimentos da fibra acima de 10km. Já o efeito Brillouin estimulado (*Stimulated Brillouin Scattering*, SBS) tem aplicação no monitoramento distribuído de temperatura e deformação mecânica, com resolução em temperatura de 2°C e de resolução entre pontos sensores de 5m, com a utilização da fibra com comprimentos até 22km.

Tanto o SRS quanto o SBS têm interação da luz com a matéria, ou seja, o campo óptico irá interagir com a fibra óptica e essa interação da luz com as vibrações

dão origem ao espalhamento inelástico. As vibrações ópticas de alta frequência dão origem ao SRS e as vibrações acústicas de baixa frequência originam o SBS.

Basicamente existem três processos que contribuem para o espalhamento da luz. Os efeitos Raman, Brillouin e Rayleigh, sendo os dois primeiros considerados espalhamentos inelásticos, na qual a energia do fóton espalhada e do incidente são diferentes entre si (JÚNIOR, P. C. D., 2006).

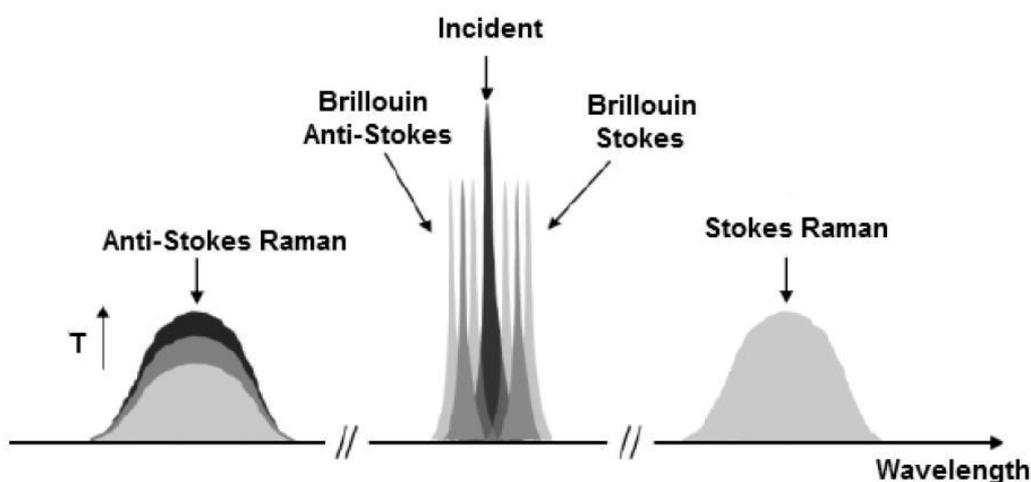
Os métodos descritos têm por finalidade analisar a viabilidade técnica em utilizar a fibra óptica como meio para a monitoramento da temperatura distribuída no enrolamento do transformador.

2.6.2.2 Método Raman

Um feixe de luz de alta potência acoplada em uma fibra óptica irá propagar e espalhar podendo dispersar nos métodos de Raman, Brillouin e Rayleigh. Seja qualquer alteração nos parâmetros físicos como temperatura, pressão, o sinal irá modular o sinal guiado através da fibra (SILVA, L. C. B.; PONTES; SEGATTO, 2017).

Com isso, ao ocorrer interação da luz de alta intensidade com as moléculas do material que é utilizado para a construção da fibra óptica, ocorrerá trocas de energia entres fótons e as moléculas do material. Essa troca de energia faz com que seja gerado novos campos eletromagnéticos com frequências diferentes espalhando-se em várias direções no interior da fibra, como pode ser visto da figura 11.

Figura 11: Dispersão no interior da fibra



Fonte: SILVA, L. C. B.; PONTES; SEGATTO (2017)

Nota-se que os sinais Stokes e anti-Stokes se referem ao efeito Raman, no qual a luz incidente interage inelasticamente com os eletros da molécula. Com isso, a molécula emite uma luz com duas características, sendo essas: Stokes, que representa a luz de baixa frequência e anti-Stokes, a luz de frequência mais alta. Essas duas características representam o estado de energia dos elétrons que os fótons encontraram (TYLER et al., 2009).

A intensidade do sinal é influenciada pela temperatura da fibra no local onde está inserida, ou seja, a componente de luz de frequência mais alta exibe uma forte dependência da temperatura enquanto a componente de luz de baixa frequência sofre pouca dependência da temperatura (TYLER et al., 2009).

Os métodos Raman, Brillouin e Rayleigh ocorrem de forma simultâneas na fibra, sendo que, o que irá diferenciá-los será um limiar específico de potência que esteja sendo observado.

De maneira geral, a expressão que representa a polarização do meio modificada pela radiação é definida como:

$$\begin{aligned}
 P = & \vec{X}_0 \cdot E_0 e^{i(K_i \cdot r - \omega_i t)} + \\
 & E_0 \cdot u_0 e^{i[(K_i \pm q) \cdot r - (\omega_i \pm \omega_0) t]} \frac{d\vec{X}}{du} + \\
 & \frac{1}{2} E_0^2 \cdot u_0^2 e^{i[(K_i \pm 2q) \cdot r - (\omega_i \pm 2\omega_0) t]} \frac{d^2\vec{X}}{du^2} + \dots,
 \end{aligned} \tag{14}$$

O primeiro termo representa o espalhamento elástico de luz devido ao fato de que a polarização oscilante tem a mesma frequência da radiação incidente. Já o segundo termo representa o espalhamento Raman de primeira ordem nos quais as frequências do sistema oscilante são diminuídas ou aumentadas. O terceiro termo representa o espalhamento Raman de segunda ordem, e assim continua sucessivamente (RODRIGUES; GALZERANI, 2012).

2.6.2.3 Método Rayleigh

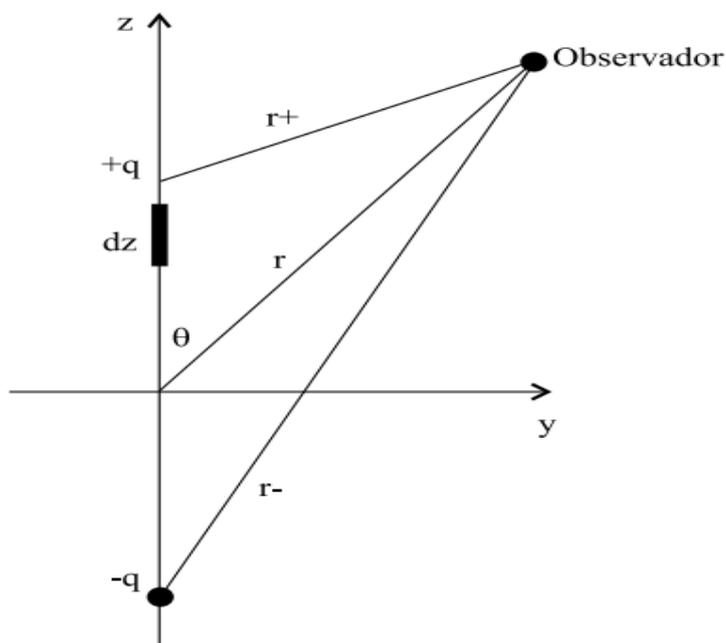
Data-se que o primeiro estudo sobre o espalhamento da luz por pequenas partículas foi feito por Lord Rayleigh em 1871. A partir desse ponto, foi desenvolvida

uma lei que seria aplicada a qualquer intensidade de luz que tivesse um índice de refração diferente daquele do meio no qual estava imerso (KRAPAS; SANTOS, 2002).

Com isso, foi considerado que as dimensões lineares das partículas eram menores que o comprimento de onda da luz espalhada. No espalhamento Rayleigh, a partícula é considerada como um dipolo elétrico onde a fonte de excitação é a incidência da luz, ou seja, a radiação eletromagnética é que irá excitar o dipolo elétrico.

Observe que a figura 12 representa um dipolo elétrico oscilante.

Figura 12: Dipolo elétrico oscilante



Fonte: FUJIMOTO; MURAMATSU (2010)

Através dessa figura obtém-se a intensidade I da radiação através da média do módulo do vetor de Poynting.

$$I \propto \langle |\vec{S}| \rangle \tag{15}$$

$$\langle |\vec{S}| \rangle = \hat{r}r \tag{16}$$

$$I \propto \left(\frac{\mu_0 p_0^2 \sin^2 \theta}{32 \pi^2 c r^2} \right) \omega^4 \tag{17}$$

De acordo com a equação 9, a intensidade da luz irradiada aumenta com a quarta potência da frequência. A oscilação dos dipolos é no plano ortogonal aos raios do sol e as ondas eletromagnéticas são no plano transversal (FUJIMOTO; MURAMATSU, 2010).

É através do espalhamento do Rayleigh que é possível explicar o azul do céu e o avermelhado do por sol.

3 MONITORAMENTO TÉRMICO DO TRANSFORMADOR POR MEIO DA RFO

Um dos problemas encontrados na transmissão de energia através de transformadores está no sobreaquecimento dos enrolamentos que ocorre devido a perdas inerentes a transmissão da energia de um circuito a outro. O transformador é a máquina mais eficiente em transmissão de energia a longas distâncias, porém, um novo problema é presenciado nessa máquina referente ao sobreaquecimento do enrolamento. Com a elevação da temperatura nos enrolamentos ao longo de vários anos em operação, problemas referentes a degradação do isolamento tornam-se mais comuns causando uma redução na capacidade de transmissão e no tempo de vida útil do equipamento. A elevação da temperatura no transformador torna-se mais frequentes quando está operando em regime sobrecarregado.

De acordo com a seção 2.3.5, a temperatura no interior do transformador é obtida pela média dos pontos mais quentes dos transformadores, ou seja, a temperatura do topo da bobina. Devido a fatores técnicos, a temperatura interna em que os enrolamentos estão submetidos são mensuradas de forma indireta, sendo utilizados instrumentos como termopares ou por imagem térmica, acarretando uma imprecisão nos valores mensurados gerando uma margem de erros para o perfeito dimensionamento da máquina. Porém, em se tratando de rede de distribuição urbana, é praticamente impossível determinar o dimensionamento correto para os transformadores considerando que há sempre novas construções requerendo energia elétrica, fazendo com que haja um pedido de aumento de carga por parte do consumidor. Esse aumento de carga no transformador faz com que sua temperatura seja elevada a níveis mais altos, ultrapassando os níveis determinados pelos ensaios de elevação de temperatura feitos pelos fabricantes.

Devido aos campos eletromagnéticos criados pela bobina do transformador torna-se inviável a utilização de instrumentos de medição interna e direta, o que na maioria dos transformadores de grande porte é utilizado apenas o termopar localizado na parte superior do tanque de óleo do transformador a fim de monitorar a temperatura do topo do óleo e não a do enrolamento. Considerando essas particularidades do transformador, é levantada a seguinte questão: como monitorar a temperatura distribuída do enrolamento do transformador de modo direto?

O método proposto analisa a perturbação que ocorre no comprimento da onda de um sinal óptico quando este é submetido um ponto específico de uma superfície

onde ocorre uma variação de temperatura, demonstrando que a variação no comprimento da onda do sinal pode ser utilizada para determinar a temperatura do enrolamento do transformador.

3.1 Monitoramento térmico do transformador

De acordo com a seção 2.3.3, a temperatura do enrolamento do transformador quando está acima dos valores permitidos pela NBR-5380 causa danos ao material isolante e como consequência o equipamento vai reduzir sua capacidade de transmissão e tempo de vida útil.

Os dados coletados durante o monitoramento térmico em tempo real desse equipamento mostram os períodos de operação em que ocorreu variação da temperatura em função da carga que está sendo suprida. Diante desses dados fica fácil desenvolver uma tabela de manutenção preventiva/corretiva a fim de evitar que esse transformador possa causar algum acidente devido ao sobreaquecimento.

Diante da necessidade em mensurar a temperatura do enrolamento do transformador de forma distribuída através de instrumentos que não sofrem influência externa (campo elétrico e magnético), foi feita uma simulação no software *every circuit* que leva em consideração os conceitos teóricos exibidos nas seções 2.6 e 2.6.1.4.

Com a aplicação da RFO para o monitoramento térmico do transformador cuidados devem ser tomados considerando a fragilidade da fibra. Nessa pesquisa é considerada que a fibra óptica é mantida em contato direto com o enrolamento do transformador e de forma perpendicular em que foi enrolado as bobinas. Desta forma a fibra coletará os dados com maior precisão, pois estará em contato direto como o enrolamento.

De acordo a opção do projetista, a fibra pode ser aplicada em cada camada no enrolamento permitindo que seja monitorada a temperatura em cada camada do transformador. Porém, esse não é o único método, há outro em que a fibra é enrolada no mesmo sentido em que foi enrolado a bobina. Com isso, essa pesquisa defende que a melhor forma para utilizar a fibra é aplicando-a de modo perpendicular ao enrolamento.

3.2 Representação do modelo térmico proposto

Os sensores ópticos estão tendo várias aplicações, e atualmente estão sendo aplicados em transformadores para determinar a sua temperatura. Para utilizar sensores ópticos em transformadores deve-se determinar os parâmetros dos sensores que serão utilizados e o tipo de transformador que será utilizado, além de considerar os parâmetros do modelo do transformador e a qual finalidade que ele está sendo empregado no sistema elétrico.

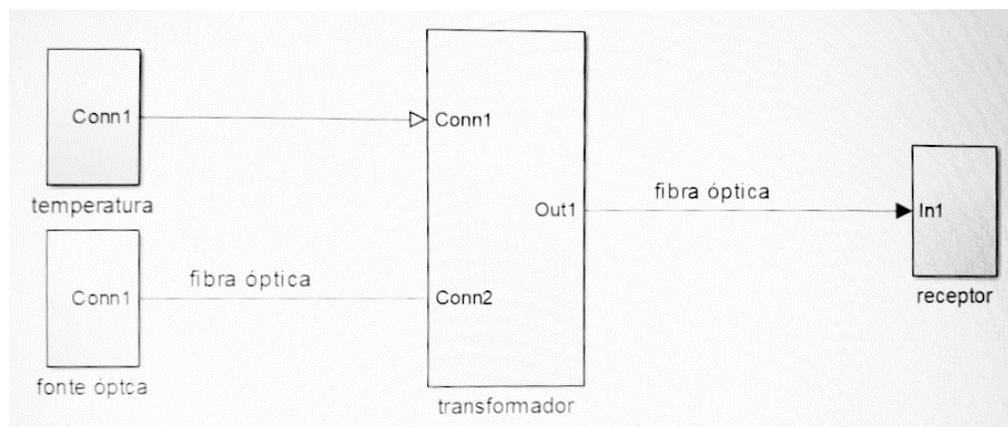
Para que se obtenha valores precisos por meio de sensores ópticos são necessários alguns cuidados, entre eles estão:

- a) tipo de sensor – SBS, SRS;
- b) qual a temperatura do material isolante suportada.

Em um circuito elétrico a energia térmica é compreendida como a queda de tensão em um resistor que possui seu valor ôhmico conhecido, e o fluxo de calor com a corrente elétrica que circula no circuito. A simulação feita no circuito elétrico ilustrado na figura 14 permite representar os parâmetros térmicos do transformador, sendo:

- a) fluxo de calor representado por corrente elétrica;
- b) temperatura representada por tensão;
- c) transferência de calor representada por resistência elétrica.

O diagrama de bloco da figura 13 representa o transformador, uma fonte de sinal óptico e o receptor, esse último mostrará na sua tela o sinal óptico original a modificação que ele sofrerá em função da temperatura. Observa-se que o bloco temperatura embora esteja fora do bloco transformador faz parte do transformador, pois representa a variação da temperatura do enrolamento em função da carga que está sendo suprida pelo transformador no decorrer do tempo.

Figura 13: Representação da fonte óptica, transformador e osciloscópio

Fonte: Autor (2018)

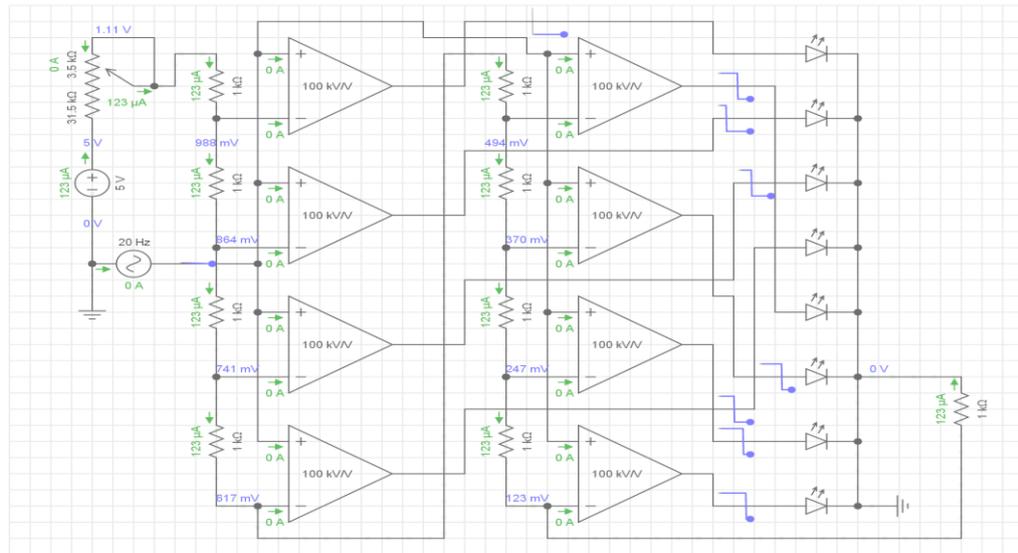
Considerando que o transformador está sendo alimentado por uma fonte de tensão dentro dos seus parâmetros nominais e que a carga a ser suprida sofre um aumento em um dado período, isso faz com que o transformador aumente sua capacidade de conversão de energia, gerando um aumento de corrente nos enrolamentos e como consequência do aumento da corrente há maior dissipação de energia térmica por efeito Joule.

O bloco temperatura representa a variação da temperatura no transformador ao ocorre um aumento de carga, com isso, ao variar a temperatura foi possível observar que ocorreu uma alteração no sinal óptico exibido no osciloscópio em relação ao sinal emitido pela fonte óptica.

Ao alterar a temperatura do transformador o sinal varia, como pode ser visualizado na figura 15. Na simulação, o fluxo de calor é representado pela corrente que circula no circuito, a temperatura como a tensão elétrica e o mecanismo de transferência de calor como resistência elétrica.

3.3 Representação do sinal óptico ao passar por um ponto quente do transformador

A simulação feita no *every circuit* tomou como base o circuito representado pela figura 14, sendo que por meio deste circuito será testada a teoria citada na seção 2.6.1.4 que explicará a modificação no sinal óptico ao passar por um ponto quente do transformador.

Figura 14: Circuito equivalente do diagrama de bloco

Fonte: Autor, 2018

O diagrama de bloco pode ser representado por um circuito equivalente como o da figura 14. A fonte óptica é representada pelas duas fontes de tensão sendo que a fonte de tensão contínua que permite alterar a amplitude do sinal e a fonte alternada permite alterar a frequência do sinal na entrada. De acordo com a variação da resistência no reostato, os diodos emissores de luz (*Light Emitting Diodes*, LED's) sofrem alteração no brilho emitido, demonstrando que a perturbação causada pela modificação da resistência alterou o comprimento da onda do sinal de origem.

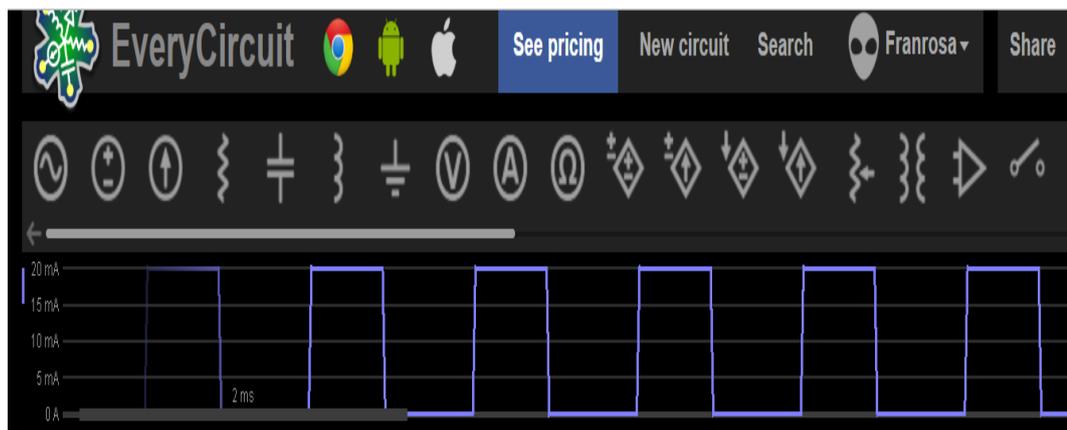
Dentre os parâmetros da fibra a serem modificados pela radiação térmica do transformador, o parâmetro a ser analisado será o comprimento da onda como descrito por Balbinot e Brusamarello (2010). O modelo simulado considera uma fibra multimodal com índice de refração em degrau constante. Essa fibra é econômica financeiramente e fácil de construir, além de possuir uma grande capacidade em capturar luz, permitindo que sejam utilizados emissores mais baratos.

A sensibilidade do sinal óptico à temperatura é definida pela equação 8 como sendo a razão do comprimento da onda da rede da fibra e a variação da temperatura da rede, de modo que os valores dos coeficientes de expansão térmico e do coeficiente termo-óptico definem o grau de sensibilidade térmica da rede da fibra quando a variação do índice de refração é devido a temperatura.

O resultado da simulação do circuito da figura 14 comprova que o comprimento da onda do sinal original sofre alteração de acordo com a variação da temperatura.

De acordo com a simulação, o sinal inserido no circuito com amplitude de 5V e uma frequência de 1kHz, e pode-se observar que o comprimento da onda do sinal foi alterado em função da temperatura, como pode ser visto na figura 15.

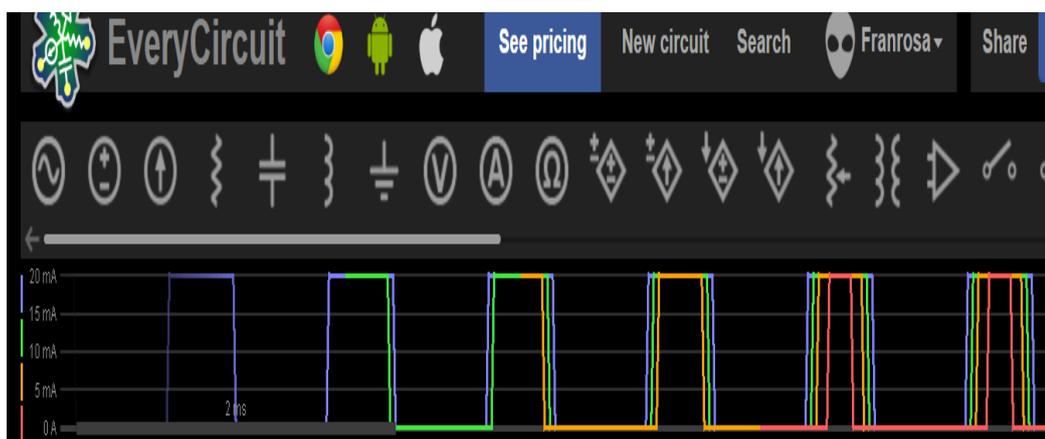
Figura 15: Sinal original após passar pelo transformador



Fonte: Autor (2018)

O resultado da simulação é mostrado na figura 16, considerando que a temperatura no enrolamento esteja aumentando gradativamente por meio do reostato. Notam-se que as alterações nas formas de ondas do sinal original, independentemente se o sinal é analógico ou digital. A figura 15 apresenta um índice de refração em degrau bem definido, na qual a variação no comprimento da onda ocorre de acordo com a seção transversal do cabo caracterizando o formato do sinal como mostrado na figura 15 e 16.

A equação 8 permite determinar a sensibilidade da fibra óptica a temperatura considerando os coeficientes de expansão térmico e termo-óptico. Esses coeficientes na equação representam o grau em que ocorre mudanças nas dimensões da fibra e varia o valor de acordo com o tipo de fibra e dopagem. Para fibras de sílica o valor do coeficiente de expansão térmico é $\alpha_{\Lambda} \approx 0.55 \times 10^{-6} K^{-1}$ e o coeficiente termo-óptico para fibras de sílica dopada com germânio é $\alpha_n \approx 8.6 \times 10^{-6} K^{-1}$.

Figura 16: Sinais sendo gerados em função da temperatura

Fonte: Autor (2018)

Na simulação, o valor do reostato foi ajustado para ter uma resistência de $35\text{k}\Omega$ a temperatura de 35°C . Os ajustes no seu valor ôhmico foram feitos de modo a representar a elevação da temperatura no enrolamento. O índice em degrau representado pela cor azul na figura 15 considera que o sinal de entrada passou pelo enrolamento do transformador a 35°C com amplitude de 20mA e com período de 2ms , onde nessa condição a temperatura do transformador está dentro dos padrões estabelecidos pelos fabricantes e o sinal não sofre alteração devido a sensibilidade da fibra ser baixa a ponto de não modificar o sinal de origem, porém o sinal ainda permanece com as características da fibra em transmitir um sinal de índice de refração em degrau.

Nota-se que de acordo com o valor do ajuste do reostato, o comprimento da onda da fibra é modificado. Na figura 16 a temperatura foi elevada em 10% a cada pico do sinal, ou seja, quando o sinal atingisse o valor de pico de 20mA um novo sinal surgirá na tela de simulação representando que a temperatura no enrolamento do transformador aumentou.

Ao compararmos as figuras 15 e 16, fica evidente que o comprimento da onda da fibra é modificado à medida em que a temperatura é elevada, que considera apenas o comprimento da onda com uma das propriedades da fibra que é alterada pela temperatura.

A variação do comprimento da onda da fibra óptica em função da temperatura ou de perturbações externas, requer ter conhecimento de suas propriedades espectrais e das perturbações externas as quais podem causar alguma interferência na sua aplicação. Na simulação foi desconsiderado qualquer perturbação externa e

mecânica da fibra, podendo ser utilizada a equação 7 para determinar o comprimento da onda da fibra óptica.

Na simulação o transformador é considerado como um circuito concentrado no qual a temperatura é a única grandeza a ser monitorada. Dentre as várias formas de aplicação de sensores ópticos, nessa pesquisa foi destacado as principais propriedades da fibra a ser alterada em função da temperatura.

De acordo com a propriedade da fibra óptica escolhida para análise, o comprimento da onda foi modificado devido a variação da temperatura no meio em que foi imersa ou próxima, não sendo necessário estar em contato direto, pois a sensibilidade do sensor óptico se dá em função dos coeficientes de expansão térmico e termo-óptico como foi mencionado nas seções anteriores.

A topologia adotada considera a fibra como um sensor intrínseco na qual a fibra permite que seja mensurada uma grandeza física ao longo da sua extensão, ou seja, de forma contínua e a cada ponto da sua extensão, apresentando três métodos em que a fibra é o próprio elemento de medição podendo ser na ordem de centímetros, metros ou quilômetros.

3.4 Resultado encontrado

O objetivo da simulação é determinar o que ocorre quando um sinal óptico ao passar por um ponto quente. Como descrito nas seções anteriores, a temperatura interna do transformador pode chegar a valores muito altos, causando danos ao material isolante do equipamento e como consequência, uma redução no tempo de vida útil.

De modo a comprovar a teoria e por meio da simulação, constata-se que ocorre alteração no comprimento de onda do sinal óptico ao passar em um local quente. Por meio de técnicas específicas, esses sinais podem ser trabalhados e utilizados para determinar qual a temperatura do enrolamento do transformador, mas é preciso determinar o grau de sensibilidade da fibra, ou seja, os seus coeficientes de expansão térmico e termo-óptico.

Para determinar o valor exato da temperatura é necessário que a luz refletida no interior da fibra óptica seja enviada a um sistema de detecção onde a variação do comprimento de onda da fibra é medido.

4 CONCLUSÃO

Os avanços tecnológicos em rede de fibra óptica permitem que a própria fibra seja utilizada como sensor com as mais variáveis aplicações. Nesse contexto, a fibra óptica está sendo aplicada no monitoramento de temperatura em transformadores devido a suas vantagens em meios onde campos eletromagnéticos são intensos. Dentre as várias vantagens da fibra, é destacada nesse trabalho a capacidade da fibra em determinar a temperatura do enrolamento do transformador de modo direto.

De acordo com os resultados obtidos na simulação, a fibra óptica pode ser aplicada em transformadores a fim de monitorar a temperatura do enrolamento de modo direto ou indireto dependendo da abordagem a ser adotada.

Na simulação, ao alterar a temperatura do transformador observa-se que o sinal injetado na fibra foi alterado e o sinal gerado pela influência da temperatura diferenciava-se do sinal de origem apenas no comprimento da onda. As oscilografias exibidas na tela de simulação correspondem a um único sinal, mas a título de comparação foram mantidos os sinais anteriores para que sejam mostradas as alterações ocorridas.

Dentre as propriedades da fibra que são influenciadas pela temperatura, o comprimento da onda é o que foi analisado nesse trabalho, porém, o monitoramento térmico de enrolamento de transformadores não está limitado apenas a essa propriedade do sinal óptico, podendo ser abordadas outras propriedades ópticas.

Os resultados da simulação permitem afirmar que a fibra óptica é um instrumento que permite ser aplicada no monitoramento térmico em transformadores, contudo, os resultados foram gerados por um software onde alguns parâmetros dos transformadores não foram modelados, como coeficientes térmicos, eficiência do sistema de resfriamentos, dentre outros. Outros métodos de simulação podem ser feitos a fim de comparar a integridade dos resultados obtidos neste trabalho, mas isso é proposta para trabalhos futuros.

4.1 TRABALHOS FUTUROS

- a) Analisar viabilidade econômica em monitoramento térmico de transformadores por meio de fibra óptica;
- b) Modelar um transformador, com a fibra óptica inserida no núcleo, em software de simulação termodinâmica;
- c) Analisar a viabilidade técnica do monitoramento térmico de linhas aéreas utilizando o espalhamento Brillouin, Raman e Rayleigh.

5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICA (ABNT). NBR 5380: *transformador de potência*. Rio de Janeiro, 1993.

AZEVEDO, R. M.; TAVARES, A. M. *Apostila de transformador I*. Pelotas, 2011. (Apostila do Curso Técnico de Eletrotécnica – Instituto Federal Sul-Rio-Grandense).

BALBINOT, A.; BRUSAMARELLO, V. J. *Instrumentação e Fundamentos de Medidas*. 2. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2010. v. 1, 404p.

BARROS, P. C. P. S. *Estudo do Sistema Térmico de um Transformador*. 2007. 71p. Dissertação (Mestre em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores). Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, 2007.

CHAPMAN, S. J. *Fundamentos de Máquinas Elétricas*. 5. ed. São Paulo: AMGH, 2013. 684p.

CUNHA, J. R. F. A. *Modelo Teórico de Sensores Ópticos Baseados em Fibras com Grade de Bragg*. 2007. 73p. Dissertação (Mestre em Física). Universidade Federal do Pará, Belém, 2007.

DIAS, R. A. et al. *Monitoramento de transformadores utilizando sensores à fibra óptica: técnicas e aplicação*. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SISTEMAS ELÉTRICOS, 4, 2012, Goiana. Anais do IV Simpósio Brasileiro de Sistema Elétricos, 2012. p.1-5.

FARIA, I. P. *Proposição e comparação de técnicas de mapeamento térmico volumétrico para transformadores de potência*. Dissertação (Mestre em Ciências em Engenharia Elétrica). Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2012.

FIGUEIREDO, J. M. F. L. *Sensores de fibra óptica para uso avançado em compósitos poliméricos*. Dissertação (Mestre em Engenharia Elétrica). Universidade de Aveiro, Aveiro, 2009.

FILHO, J. M. *Manual de Equipamentos Elétricos*. 4. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2015. 669p.

FILHO, J. S. *Controle operacional de equipamentos na fabricação de bebidas*. 1. ed. São Paulo: SENAI, 2016, 200p.

FITZGERALD, A. E.; JÚNIOR, C. K.; UMANS, S. D. *Máquinas Elétricas: com introdução à eletrônica de potência*. 6. ed. Porto Alegre: Bookman, 2006. 648p.

FOROUZAN, B. A. *Comunicação de dados e redes de computadores*. 4. ed. Brasil: AMGH, 2009. 1134p.

FUJIMOTO, M. N. R.T.G.; MURAMATSU, R. S. A. M. *O azul do céu e o vermelho do pôr-do-sol*. Revista Brasileira de Ensino de Física, São Paulo, v. 32, n. 3, p. 1-3, fev. 2010.

HILL, K. O.; FUJII, F.; JOHNSON, D. C.; KAWASAKI, B. S. *Photosensitivity in optical fiber waveguides: Application to reflection filter fabrication*. Applied Physics Letters, v. 32, n. 10, p. 647–649, 1978.

INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELETRONICS ENGINEERS (IEEE-SA Standards Board). C57.91: *Guide for loading mineral-oil-immersed transformers and step- voltage regulators/sponsor, transformers Committee of the IEEE Power & Energy Society*. New York, 2012.

INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELETRONICS ENGINEERS (IEEE-SA Standards Board). C57.110: *IEEE recommended practice for establishing transformer capability when supplying nonsinusoidal load currents / sponsor, Performance Characteristics Subcommittee of the Transformers Committee of the IEEE Power Engineering Society*. New York, 1988.

JÚNIOR, L. E. F. *Fundamentos de Comunicação Eletrônica*. 3. ed. Porto Alegre: AMGH, 2013. 241p.

JÚNIOR, P. C. D. *Espalhamento Brillouin em fibras fotônicas*. Tese (Doutor em Ciências). Universidade Estadual de Campinas. Instituto de Física Gleb Wataghin, Campinas, 2006.

KARACA, H. *Prediction of hot-spot and top-oil temperature of power transformers according to IEEE standards C57.110-1998 and C57.91-1995*. Thesis (Master of Science). Middle East Technical University, School of Natural and Applied Sciences, 2007.

KNIGHT, R. D. *Física: uma abordagem estratégica*. 2. ed. São Paulo: Bookman, 2009. v. 2. 392p.

KOSOW, I. L. *Máquinas Elétricas e Transformadores*. 4. ed. Porto Alegre: Globo, 1982. v.1. 668p.

KRAPAS, S.; SANTOS, P. A. M. *Modelagem do espalhamento Rayleigh da luz com propósitos de ensino e de aprendizagem**. Caderno Brasileiro de Ensino de Física, Niterói, v. 19, n. 3, p.341-350, dez. 2002.

OLIVA, E. R. *Transformadores de potencia de medida y de protección*. 7. ed. Barcelona: MARCOMBO, 2010. 304p.

OLIVEIRA, F. M. D. R. *Rede de Bragg aplicada na monitoração da deformação mecânica de verniz acrílico durante a secagem*. Dissertação (Mestre em Ciências). Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2013.

OLIVEIRA, J. C.; COGO, J.R.; ABREU, J. P. G. *Transformadores Teoria e Ensaio*. 2. ed. São Paulo: Edgard Blucher, 1984. 174p.

OLIVEIRA, V. *Rede de Bragg para medições em altas temperaturas*. Tese (Doutor em Ciências). Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2012.

PULIDO, M. A. *Transformadores: cálculo fácil de transformadores y autotransformadores, monofásicos y trifásicos de baja tensión*. 1. ed. Barcelona: MARCOMBO, 2009. 212p.

MATIAS, F. C. S. *Simulação numérica de fibras compensadoras de dispersão e de redes de Bragg*. Dissertação (Mestre em Engenharia Electrotécnica e de Computadores). Instituto Superior Técnico. Técnico Lisboa, Lisboa, 2014.

MILLER, R. D. et al. *Miller: Anestesia*. 8. ed. [s.l]: Elsevier, 2018. 3328p.

NOGUEIRA, R. N. *Redes de Bragg em fibra óptica*. 2005. 319p. Dissertação (Doutor em Física). Universidade de Aveiro, Aveiro, 2005.

REIS, J. B. A. *A arquitetura metodológica de Michael Faraday*. 2006. 124p. Tese (Doutor em História da Ciência) – Pontifícia Universidade Católica, São Paulo, 2006.

REIS, M. A.; VITIELLO, S. A. *Método Variacional com Monte Carlo aplicado ao oscilador harmônico quântico*. Revista Brasileira de Ensino de Física, Campinas, v. 28, n. 1, p. 45-50, jan. 2006.

REZENDE, V. *O método de Galerkin*. 2005. 42p. Dissertação (Mestre em Ciências). Departamento de Matemática. Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2005.

RODRIGUES, A. G.; GALZERANI, J. C. *Espectroscopias de infravermelho, Raman e de fotoluminescência: potencialidades e complementaridades*. Revista brasileira de Ensino de Física, São Carlos, v. 34, n. 4, p.1-9, São Paulo, dez. 2012.

ROLLE, K. C. *Termodinâmica*. 6. ed. México: Pearson, 2006. 748p.

ROSSETTO, J. F. *Sensor distribuído de temperatura e deformação mecânica utilizando o espalhamento Brillouin estimulado em fibras ópticas*. Dissertação (Mestre em Engenharia Elétrica). Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação. Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2000.

RUSCHEL, O. T. *Princípios da comunicação digital*. [s.n]. Porto Alegre: Edipucrs, 1996. v. 3. 223p.

SILVA, L. C. B.; PONTES, M. J.; SEGATTO, M. E. V. *Analysis of parameters for a distributed temperature sensing based on Raman scattering*. Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications, São Caetano do Sul, v. 16, n. 1, p. 259-272, mar. 2017.

SILVA, J. R. *Avaliação "on-line" de temperatura do transformador de potência através de modelagem numérica magnética e termodinâmica*. 2015. 152p. Tese (Doutor em Engenharia Elétrica). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2015.

SIMONE, G. A. *Transformadores: teoria e exercícios*. 1. ed. São Paulo: Érika, 2010. 312p.

SOLÉ, A. C. *Instrumentación industrial*. 8. ed. Barcelona: Marcombo, 2011. 800p.

SOUZA, K. M. *Validação de modelo térmico e elétrico de motor de indução empregando redes de Bragg em fibra ótica*. 2011. 122P. Dissertação (Mestre em Engenharia Elétrica). Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, 2011.

SOUZA, V. R. *Uma proposta para o ensino de energia mecânica e sua conservação através do uso de analogias*. 2015. 82p. Dissertação (Mestre em Ensino de Física) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2015.

TRUMP, D.; KIYOSAKI, R. *O toque de midas: porque alguns empreendedores enriquecem – e a maioria não chega lá*. [s.n.]. Rio de Janeiro: Alta Books, 2017. 240p.

TYLER, S. W. et al. *Environmental temperature sensing using Raman spectra DTS fiber-optic methods*. Water Resources Research, v. 45. W00D23, doi:10.1029/2008WR007052, 2009.

UMANS, S. D. *Máquinas Elétricas: de Fitzgerald e Kingsley*. 7. ed. Porto Alegre: AMGH, 2014. 708p.

ZIENKIEWICZ, O. C.; TAYLOR, R. L.; ZHU, J.Z. *The Finite Element Method: Its Basis and Fundamentals*. 6th. ed. Oxford: ELSEVIER, 2005.