

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO,
CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO CEARÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
TELECOMUNICAÇÕES - PPGET**

GUILHERME MATIAS DE MEDEIROS

**SISTEMA REMOTO DE MONITORAMENTO DE PONTOS QUENTES
EM CONEXÕES ELÉTRICAS UTILIZANDO SENSORES ÓPTICOS**

Fortaleza, Ceará

2019

GUILHERME MATIAS DE MEDEIROS

SISTEMA REMOTO DE MONITORAMENTO DE PONTOS QUENTES EM
CONEXÕES ELÉTRICAS UTILIZANDO SENSORES ÓPTICOS

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia de Telecomunicações do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará como requisito parcial para a obtenção do título de mestre em Engenharia de Telecomunicações. Área de concentração: Microondas e Óptica Integrada.

Orientador: Dr. Glendo de Freitas Guimarães

Fortaleza, Ceará

2019

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Instituto Federal do Ceará - IFCE
Sistema de Bibliotecas - SIBI
Ficha catalográfica elaborada pelo SIBI/IFCE, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- M488s Medeiros, Guilherme Matias de.
 Sistema Remoto de Monitoramento de Pontos Quentes em Conexões Elétrica Utilizando Sensores Ópticos / Guilherme Matias de Medeiros. - 2020.
 67 f. : il.
- Dissertação (Mestrado) - Instituto Federal do Ceará, Mestrado em Engenharia de Telecomunicações, Campus Fortaleza, 2020.
 Orientação: Prof. Dr. Glendo de Freitas Guimarães.
1. Sensor Óptico. 2. Grades de Bragg. 3. FBG. 4. Pontos Quentes. I. Título.

CDD 621.382



INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO CEARÁ
COORDENAÇÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE
TELECOMUNICAÇÕES

GUILHERME MATIAS DE MEDEIROS

Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Telecomunicações, sendo aprovada pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Telecomunicações do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará e pela banca examinadora.

Dr. Glendo de Freitas Guimarães (orientador)
Instituto Federal do Ceará – IFCE

Dr. José Rubens Rodrigues de Sousa
Universidade de Fortaleza – UNIFOR

Dr. Danilo Sousa Rocha
Instituto Federal do Ceará – IFCE

Dr. Wilton Bezerra de Fraga
Instituto Federal do Ceará – IFCE

Dr. Daniel Xavier Gouveia
Instituto Federal do Ceará – IFCE

*Dedico à todos que acompanharam minha trajetória, minhas conquistas e minhas derrotas,
que vivenciaram meus sonhos e pesadelos, àqueles que me fizeram crescer e amadurecer.*

Agradecimentos

Primeiramente, agradeço à minha família que estava comigo em todos os momentos, bons ou ruins, e me deram o apoio e suporte necessário para eu atingir meus objetivos.

Agradeço àqueles que acreditaram no meu potencial e na minha capacidade, principalmente ao meu amigo, conselheiro e orientador prof. Glendo de Freitas Guimarães.

Aos meus irmãos, amigos e colegas de turma do mestrado, principalmente, Robert Marques Oliveira, João Isaac Silva Miranda e Robson dos Santos Sampaio.

À família Fotônica que em todos os momentos e todos os anos da minha formação acadêmica, me acolheram como jamais fora acolhido em outro laboratório.

Aos professores da banca julgadora.

Aos professores do Programa de Pós Graduação em Engenharia de Telecomunicações (PPGET), pois sem o compartilhamento do conhecimento isso não seria possível.

À todos os funcionários do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará.

À Companhia de Eletricidade do Amapá (CEA) e à Fundação Cearense de Pesquisa e Cultura (FCPC) que nos contemplaram com a oportunidade de realizar essa pesquisa.

*“You may never know what results come of your actions, but if you do nothing, there will
be no results.”
(Mahatma Gandhi)*

Resumo

O monitoramento das linhas de transmissão/distribuição é tarefa importante a ser realizada por concessionárias de energia elétrica e está se tornando comum em alguns países. Obter dados e características da rede elétrica possibilita à concessionária analisar a qualidade de sua rede, agendar manutenções preditivas e evitar a degradação de equipamentos. A partir dos dados obtidos, programas de manutenção periódicos podem ser feitos para evitar falhas que ocasionam prejuízos financeiros e sociais. A temperatura da conexão e o surgimento de pontos quentes em conexões elétricas é um dos principais parâmetros a serem monitorados em sistemas de transmissão/distribuição uma vez que, o surgimento de pontos quentes acarretam na conversão de energia elétrica em energia térmica e ainda podem prejudicar no fornecimento de energia elétrica ao usuários. Entretanto, para monitorar o surgimento de pontos quentes na rede elétrica é preciso enviar equipes de campo para realizar medida termográficas de pontos críticos da rede. Todavia, essa tarefa demanda uma equipe bem treinada e possui um custo operacional alto. A partir disso, é proposto um sistema remoto de monitoramento de pontos quentes em conexões elétricas utilizando sensores ópticos. O sensor proposto vai aferir os valores de temperatura em pontos específicos da rede elétrica e enviar as informações coletadas para o servidor na Internet. Além disso, o sistema dispõe de uma plataforma web para auxiliar na gestão do técnico da concessionária sobre o surgimento de pontos quentes e suas respectivas localizações.

Palavras-chaves: Sensor óptico; Grades de Bragg em Fibra Óptica (FBG); Pontos Quentes, Efeito Joule; Redes Elétricas Inteligentes (REI).

Abstract

Monitoring transmission/distribution lines is an important task for electric utility and this technique is becoming common in some countries. Obtaining data and technical features of the power grid enables the utility to analyze the quality of its network, schedule predictive maintenance and prevent equipment degradation. From the obtained data, periodic maintenance programs can be made to avoid failures that cause financial and social losses. The temperature of the connection and the appearance of hot spots in electrical connections is one of the main parameters to be monitored in transmission/distribution systems since the appearance of hot spots leads to the conversion of electric energy to thermal energy and may also impair supply of electricity to users. However, in order to monitor the appearance of hot spots in the grid, it is necessary to send field teams to perform thermographic measurement of critical points of the grid. However, this task requires well-trained staff and has a high operating cost. From this, it is proposed a remote monitoring system of hot spots in electrical connections using optical sensors. The proposed sensor will measure the temperature values at specific points of the power grid and send the collected information to the server on the Internet. In addition, the system has a web platform to assist with the dealer's technician's management of hot spots and their locations.

Key-words: Optical Sensor; Fiber Bragg Gratings (FBG); Hot-spot; Effect Joule; Smart Grids.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Grade de Bragg em fibra óptica	24
Figura 2 – Análise da Reflexão e Transmissão de uma FBG	25
Figura 3 – Máscara de Fase para Confecção de FBGs	26
Figura 4 – Circulador óptico com FBG	28
Figura 5 – Array Waveguide Grating - AWG	32
Figura 6 – Interrogação de FBGs utilizando TDM	33
Figura 7 – Resposta de 4 FBGs utilizando técnica de TDM. Tração sendo aplicada a 2ª FBG do sistema. (a) tração de 0,042% (b) tração de 0,125% (c) tração de 0,208%	33
Figura 8 – Interrogação de FBGs utilizando FFP	35
Figura 9 – Mapa mental do projeto proposto	36
Figura 10 – Topologia do sistema remoto de monitoramento de pontos quentes	37
Figura 11 – Configuração proposta do Sensor de Temperatura	39
Figura 12 – Simulação OptiSystem na configuração proposta do sensor	41
Figura 13 – Configuração com dois circuladores	42
Figura 14 – Metodologia do experimento em laboratório	44
Figura 15 – Simulações de Temperatuara com FBG	48
Figura 16 – Gráfico de Resposta de Várias Configurações das FBGs (Matlab®)	50
Figura 17 – Gráfico de Resposta de Várias Configurações das FBGs (OptiSystem®)	51
Figura 18 – Cenário 01 - FBGs gêmeas 1,2 nm	52
Figura 19 – Gráfico de resposta da configuração 02 com Dois circuladores, medidas de aquecimento e resfriamento	54
Figura 20 – Placa eletrônica de medição	56
Figura 21 – Esquemático sistema de medição	57
Figura 22 – Diagrama de blocos do sistema de medição	57
Figura 23 – Plataforma de Monitoramento (Tela de Login)	59
Figura 24 – Plataforma de Monitoramentp (Tela Inicial)	60
Figura 25 – Plataforma de Monitoramento (Tela Geográfica)	60
Figura 26 – Tabela com os sensores cadastrados	61
Figura 27 – Gráfico comparativo entre sensores	62
Figura 28 – Gerenciamentos dos sensores instalados	62

Lista de abreviaturas e siglas

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
AWG	<i>Arrayed Waveguide Gratings</i>
CEA	Companhia de Eletricidade do Amapá
DEC	Duração Equivalente de Interrupção
DOE	Departamento de Energia Elétrica dos Estados Unidos
DWDM	<i>Dense Wavelength Division Multiplexing</i>
EMI	Electromagnetic Interference
FBG	Fiber Bragg Grating
FEC	Frequência Equivalente de Interrupção
FFP	Filtro de Fabry-Perot
FLBL	Fonte de Luz de Banda Larga
FPR	<i>Free Propagation Region</i>
FWHM	<i>Full Width Half Maximum</i>
GPRS	<i>General Packet Radio Services</i>
IRT	Infrared Thermography
LASER	<i>Light Amplified Stimulation</i>
LED	<i>Light Emitting Diode</i>
MME	Ministério de Minas e Energia
ONS	Operadora Nacional do Sistema
OTDR	<i>Optical Time Domain Reflection</i>
OSA	<i>Optical Spectrum Analyser</i>
PDI	Processamento Digital de Imagem
P&D	Pesquisa e Desenvolvimento
QEE	Qualidade de Energia Elétrica

REI	<i>Redes Elébricas Inteligentes</i>
RFI	<i>Radio Frequency Interference</i>
SMF	<i>Single Mode Fiber</i>
SOA	<i>Semiconductor Optical Amplifier</i>
TC	Transformador de Corrente
TDM	<i>Time Division Multiplexing</i>
TP	Transformador de Potência
UV	Ultravioleta
UVA	<i>Unmanned Vehicle Aerial</i>

Sumário

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	Justificativa	16
1.2	Objetivos	18
1.2.1	Objetivos específicos	18
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	19
2.1	Revisão Bibliográfica	19
2.2	Sensores em Fibra Óptica	22
2.2.1	Grades de Bragg em Fibra Óptica	23
2.2.2	Processo de Fabricação de FBGs	25
2.2.3	Análise da Variação da Temperatura em FBGs	26
2.3	Circuladores Ópticos	28
2.4	Dispositivos Optoeletrônicos	29
2.4.1	Transmissores Ópticos	29
2.4.2	LEDs	30
2.4.3	LASERs	30
2.4.4	Fotodiodo	30
2.4.5	Interrogadores Ópticos	31
2.4.5.1	Interrogador Ópticos Passivos	32
2.4.5.2	Interrogadores Ópticos Ativos	34
3	METODOLOGIA	36
3.1	Sensor Óptico de Temperatura	37
3.1.1	Simulações no OptiGrating®	37
3.1.2	Configuração do Sensor Óptico de Temperatura	38
3.2	Sistema de Medição	42
3.2.1	Calibração e Medições de Temperatura	43
3.3	Plataforma de Monitoramento	45
4	RESULTADOS	47
4.1	Sensor Óptico de Temperatura	47
4.1.1	Simulações no OptiGrating®	47
4.1.2	Configuração do Sensor Óptico de Temperatura	49
4.1.3	Experiências em Laboratório	50
4.1.4	Sistema de Medição	55
4.1.5	Calibração e Medições de Temperatura	58

4.2	Plataforma de Monitoramento	58
4.2.1	Aplicação em Segundo Plano (Back-end)	58
4.2.2	Aplicação Web (<i>Front-End</i>)	59
5	CONCLUSÕES	63
5.1	Trabalhos futuros	63
	REFERÊNCIAS	65

1 Introdução

As fontes de energia, renováveis ou não renováveis, sempre tiveram um papel fundamental para o desenvolvimento da sociedade, seja para aquecimento, para produzir combustíveis ou para o funcionamento de máquinas térmicas. Entretanto, dentre todas as fontes de energia, a energia elétrica foi a que mais se destacou para a humanidade. Criada por Nikola Tesla, a energia elétrica alternada está presente em todos os países do mundo e seu consumo determina o nível de desenvolvimento intelectual, social e econômico de uma nação.

Segundo dados da ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica, a energia elétrica também é um dos indicadores de qualidade de vida de uma sociedade, pois reflete tanto o ritmo de atividades dos setores industrial, comercial e de serviços, como também a capacidade da população para adquirir bens e serviços tecnológicos, tais como: automóveis, eletrodomésticos e eletroeletrônicos ([ANEEL, 2019a](#)).

Devido ao desenvolvimento e expansão territorial do Brasil houve, em consequência, o crescimento do consumo de energia elétrica em todos os setores. Diante disso, as concessionárias de energia elétrica precisaram ampliar suas redes de fornecimento de energia para atender a demanda da população, criando assim uma rede descentralizada, complexa e de difícil gerência. Essa complexidade se justifica, primeiramente, pela enorme extensão territorial das redes elétricas, passando pela geração, transmissão, distribuição, até chegar a residência do consumidor final, e, também, pela quantidade de dispositivos, passivos e ativos, que auxiliam todas essas etapas ([ENERGY, 2009](#)).

Nesse contexto, segundo dados da Operadora Nacional do Sistema (ONS), órgão responsável pelo gerenciamento, monitoramento e planejamento das operações de instalações de geração e transmissão de energia elétrica no país, o Brasil possui 141.388 km de linhas de transmissão, espalhadas por todo o território nacional, atendendo todos os estados do país ([ONS, 2019](#)).

Entretanto, independente da extensão e complexidade da rede elétrica, as concessionárias de energia precisam manter a qualidade no fornecimento ao consumidor final, sendo o descumprimento passível de multa aplicada pela agência reguladora. Os indicadores coletivos de continuidade, ou seja, o FEC (Frequência Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora) e o DEC (Duração Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora) apresentam-se como critérios que avaliam a disponibilidade da rede elétrica ao consumidor, quantificando o número de falhas e o intervalo de tempo da interrupção, respectivamente. Esses indicadores avaliam a qualidade do fornecimento da energia elétrica por cada concessionária de distribuição ([ANEEL, 2019c](#)).

Além das sanções aplicadas pela ANEEL, as interrupções no fornecimento de energia elétrica causam desgaste à imagem da concessionária e um prejuízo financeiro para todos os setores, interrompendo a produção no país. Além disso, os desligamentos repentinos podem implicar em danos em equipamentos da concessionária e dos usuários, sendo estes últimos indenizados pela própria concessionária. Todavia, esses custos podem ser evitados, haja vista que a maioria das falhas ocasionadas em redes elétricas é acompanhada e/ou precedida de sintomas que evidenciam sua evolução (AMIN; WOLLENBERG, 2005). Considerando o exposto, um sistema de monitoramento dos parâmetros da rede se apresenta como uma ferramenta essencial para que as concessionárias atinjam as metas de qualidade especificadas pela agência reguladora.

Ademais, o monitoramento de parâmetros da rede pode, além de reduzir as falhas, diminuir as perdas técnicas das concessionárias de energia. Segundo a ANEEL, as perdas técnicas são inerentes à atividade de distribuição de energia elétrica, pois parte da energia é dissipada no processo de transporte, transformação de tensão e medição em decorrência das leis da física. Essas perdas, portanto, estão associadas às características de carregamento e configuração das redes das concessionárias de distribuição. Além disso, as perdas técnicas estão relacionadas à transformação de energia elétrica em energia térmica nos condutores (efeito joule), perdas nos núcleos dos transformadores, perdas dielétricas etc (ANEEL, 2019b).

Nesse contexto, os pontos quentes em conexões elétricas se apresentam como uma perda técnica que, dependendo da gravidade, pode ocasionar a interrupção total do fornecimento de energia elétrica para o consumidor, afetando os parâmetros de avaliação FEC e DEC e gerando multas às concessionárias. Os pontos quentes, também chamados de “*hot spots*”, é consequência do aumento da resistência de contato do material. O calor é decorrente da dissipação de potência do conector, sendo esta potência uma função do quadrado da corrente conduzida. Como a resistência do contato é proporcional à resistividade do material, elevações na temperatura, aumentam a dissipação de calor e, conseqüentemente, as perdas técnicas do sistema (MOURA; MORAIS, 2014).

Os principais motivos para a ocorrência de pontos quentes em redes elétricas são: corrosão dos conectores e mau contato na conectorização da rede, seja em conexão de cabos, transformadores de potência, disjuntores, entre outros equipamentos da rede elétrica da concessionária. Como mencionado, a ausência da manutenção nesses pontos, pode acarretar no rompimento total da conexão e, conseqüentemente, na interrupção do fornecimento de energia para o consumidor, podendo acarretar danos aos equipamentos da rede devido ao desbalanceamento de carga repentino (HUDA; TAIB, 2013).

Diante deste cenário, as concessionárias estão investindo em um novo conceito de redes elétricas, denominado Smart Grids, ou Redes Elétricas Inteligentes (REI). As REIs surgiram com os pesquisadores Amin e Wollenberg, que a definiram como “rede elétrica

em larga escala caracterizada pela segurança, agilidade, e robustez que enfrenta novas ameaças e condições não previstas” (AMIN; WOLLENBERG, 2005).

Para o Departamento de Energia Elétrica dos Estados Unidos (DOE), as REIs é definida como um sistema automatizado, caracterizado por um fluxo bidirecional de energia elétrica e de informações, capaz de monitorar tudo, desde usinas até as preferências dos consumidores. Esse sistema incorpora na rede benefícios da computação distribuída e da comunicação para oferecer informações em tempo real e permitir o equilíbrio de oferta e demanda (ENERGY, 2009).

No Brasil, o termo Redes Elétricas Inteligentes possui várias definições, entretanto todas convergem para o uso de elementos digitais e de comunicações nas redes que transportam a energia. Esses elementos possibilitam o envio de uma gama de dados e informações para os centros de controle, onde eles são tratados, auxiliando na operação e no controle do sistema como um todo (ANEEL, 2019d).

Segundo uma pesquisa realizada por Lamin, os resultados obtidos pela adoção das Redes Elétricas Inteligentes implicam em benefícios que justificam o investimento nessa tecnologia. De acordo com a pesquisa, o uso das REIs resultou em uma diminuição de 30% da FEC e da DEC, diminuindo os custos da concessionária e ratificando o uso de sistemas de monitoramento em redes elétricas (LAMIN, 2005).

Nesse contexto, este trabalho propõe desenvolver um sistema remoto de monitoramento de pontos quentes em conexões elétricas utilizando sensores ópticos. Ademais, este trabalho faz parte de um projeto de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) em parceria com a Companhia de Eletricidade do Amapá (CEA).

1.1 Justificativa

As principais causas de falhas em sistemas elétricos são precedidos de sintomas que sinalizam a desconformidade nos parâmetros. Entretanto, devido a complexidade da rede, ausência de dispositivos que realizem o monitoramento e a falta de manutenção preditiva, esses sintomas dificilmente são identificados, e, posteriormente, acabam evoluindo para uma interrupção do sistema (AMIN; WOLLENBERG, 2005).

Atualmente, muitas concessionárias de distribuição estão adotando técnicas e processos confiáveis para realizarem esse diagnóstico. A utilização de transformadores de potência e corrente, inspeções visuais, entre outros recursos fazem parte do arsenal de medidas para acompanhar as variações da rede elétrica. Entretanto, a maioria desses dispositivos ainda não são integrados aos sistemas de monitoramento da rede. Em outras palavras, esse acompanhamento depende de um profissional técnico capacitado para realizar

as aferições e, posteriormente, transmitir os dados obtidos para aos responsáveis, com o objetivo de interpretar e realizar as ações necessárias para normalização da rede.

As inspeções visuais consistem em técnicas utilizadas para realizar a aferição de pontos quentes em conexões elétricas, com o objetivo de realizar a manutenção preditiva da rede. É uma técnica bastante eficaz, de simples realização e de baixo custo operacional. Apesar de suas vantagens, existem diversos fenômenos elétricos que ocorrem fora do campo de visão e que não são percebidos durante a inspeção visual, fenômenos que podem indicar defeitos em fases iniciais ou prestes a causar interrupção no fornecimento de energia e/ou perigos a vidas. Sua confiabilidade depende da habilidade e experiência do inspetor, que deve saber como procurar por falhas críticas e reconhecer áreas onde a falha pode ocorrer. A inspeção visual em equipamentos de alta tensão pode ser realizada diretamente (olho nu), remotamente (câmeras de vídeo) ou através de binóculos, mas o “instrumento óptico” básico é sempre o olho humano.

Uma das técnicas de manutenção preditiva que ao longo dos últimos anos passou a ser uma das mais utilizadas por parte das empresas é a Termografia Infravermelha. Haja vista que, algumas falhas que ocorrem nos circuitos aéreos de distribuição possuem características básicas de elevação anormal de temperatura de trabalho provocada pelo aumento da resistência de contato, esse fenômeno possibilita a utilização de câmeras termográficas na inspeção, que realiza com precisão o apontamento dos pontos sobreaquecidos, quantificando esse aumento irregular da temperatura. Em geral, esses eventos produzem um aquecimento que pode ser rápido ou lento, mas sempre progressivo, até a degradação total do componente ou rompimento da conexão, ocasionando a interrupção de fornecimento (JR.; ORLOVE; PETERS, 2002).

Segundo uma pesquisa realizada nas subestações da ENERGISA/PB, existem dispositivos mais suscetíveis ao surgimento de pontos quentes e necessitam de uma maior atenção por partes dos técnicos que realizam as inspeções na concessionária. No mesmo estudo, observou-se que as maiores incidências de pontos quentes eram encontrados quando não se observa as condições de compatibilidade dos metais, ou quando encontram-se conectores chapa-cabo bimetálico com condutores de alumínio, ou seja, materiais condutores diferentes. Ademais, o não cumprimento das normas relacionadas ao torque da conexão, também implicou no surgimento de pontos quentes em conexões elétricas na rede da concessionária (MOURA; MORAIS, 2014).

Além disso, segundo Arellano, as principais ocorrências de pontos quentes estão presentes em disjuntores, conectores fusíveis, defeitos em conexões elétricas, problemas de isolamento dos condutores e para-raios. Dependendo da gravidade, a falha pode ocasionar danos em equipamentos da rede elétrica (ARELLANO; HERNÁNDEZ, 2015).

Entretanto, a principal justificativa para o desenvolvimento desse projeto se enquadra no custo total relacionado à influência dos pontos quentes em redes elétricas. Desse

ponto de vista, observa-se que as perdas técnicas relacionadas ao efeito Joule gerado pela conexão, os custos operacionais relacionados a inspeção, considerando o valor homem/hora do técnico operacional e, em casos mais graves, os danos causados a rede devido à interrupção repentina, possíveis multas aplicadas pela agência reguladora e as reclamações dos consumidores se demonstram como os principais fatores para o investimento em REIs e a utilização de um sistema de monitoramento de pontos quentes em conexões elétricas utilizando sensores ópticos.

1.2 Objetivos

O objetivo deste trabalho é desenvolver um sistema remoto de monitoramento capaz de realizar aferições periódicas de temperatura em conexões elétricas, visando identificar e alertar a concessionária sobre o surgimento de pontos quentes na rede. Em consonância, será desenvolvido um sensor óptico de temperatura utilizando grades de Bragg em fibra óptica para aferir a temperatura da conexão. Além disso, visando desenvolver um sistema eficiente de monitoramento, será confeccionado uma interface Web para apresentação dos dados obtidos dos sensores e apresentação das variações de temperatura dos pontos monitorados.

1.2.1 Objetivos específicos

- Desenvolver um sensor óptico de temperatura utilizando grades de Bragg em fibra óptica.
- Criar uma plataforma de monitoramento de conexões elétricas passíveis de surgimento de pontos quentes.
- Confeccionar um protótipo para monitoramento de pontos quentes em conexões elétricas.

2 Fundamentação Teórica

2.1 Revisão Bibliográfica

As causas relacionadas ao surgimento de pontos quentes em conexões elétricas é consequência de conectores com estado avançado de corrosão, conexões com torque mínimo negligenciados, desbalanceamento de carga, sobrecarga nos equipamentos, rompimento de isolamento elétrica e defeitos em chaves seccionadoras (HUDA; TAIB, 2013). Em conjunto com redes extensas e complexas, o monitoramento desses pontos ao longo da rede pode se tornar uma operação custosa e inviável, haja vista a quantidade de possibilidades que podem ocasionar o surgimento de uma falha no sistema elétrico.

O surgimento dessa anomalia na rede elétrica se apresenta como uma falha gradativa e, sem as ferramentas adequadas, de difícil diagnóstico. Em geral, o ponto quente consiste em um fenômeno invisível ao olho humano, necessitando de ferramentas específicas para realizar sua prevenção. A principal ferramenta de detecção/diagnóstico de pontos quentes em equipamentos elétricos consiste no uso de câmeras termográficas que atuam na região do infravermelho, também denominadas, em inglês, *infrared thermography (IRT)* (HUDA; TAIB, 2013) (BAGAVATHIAPPAN et al., 2013).

Com o uso da ferramenta de diagnóstico, as concessionárias de energia elétrica realizam inspeções periódicas em suas rede para detectar precocemente o surgimento de qualquer anomalia na rede. Segundo Eads *et al* (EADS; EPPERLY; SNELL, 2000), existem duas maneiras de medir a condição de um equipamento elétrico. A primeira maneira é de forma quantitativa, observando a temperatura do equipamento e comparando-as com os dados de referência do fabricante. A segunda forma consiste em observar de maneira qualitativa, que utiliza outras conexões do equipamento para aferir a gravidade da anomalia.

Entretanto, independente da forma adotada, segundo dados da ANEEL – Resolução Normativa nº 669, do dia 14 de julho de 2015, que regulamenta os “Requisitos Mínimos de Manutenção e o Monitoramento da Manutenção de Instalações de Transmissão de Rede Básica”, as inspeções termográficas nos equipamentos e em suas conexões devem ser realizadas com uma periodicidade máxima de 6 meses. Ademais, ainda segundo o regulamento, o cumprimento das normas supracitadas não exime a concessionária de multas ou indenizações em caso de eventuais sinistros apresentados na rede elétrica (ANEEL, 2015).

Pensando nisso, a pesquisadora Wronkowicz utilizou imagem de inspeções visuais aéreas obtidas pela equipe de inspeção e aplicou em algoritmos de PDI no Matlab®. O

software desenvolvido foi capaz de detectar todos os pontos quentes encontrados na rede de transmissão de 110 kV. Entretanto, a metodologia da pesquisa aplicada ainda depende que a equipe de inspeção visual realize rondas no perímetro para capturar as imagens termográficas. (WRONKOWICZ, 2016)

Já para os pesquisadores Zhang *et al* (ZHANG *et al.*, 2016) apresentaram um sistema de monitoramento e reconhecimento de imagens para diagnóstico de falhas em transformadores elétricos em subestações, com o objetivo de evitar interrupções do sistema de energia. Haja vista que, os transformadores de potência são um dos equipamentos mais custosos da concessionária. Em consequência, se faz muito importante realizar o monitoramento de suas condições, para que não haja nenhuma interrupção do sistema e, além disso, um custo de manutenção desnecessário.

Outro estudo semelhante apresentado por Huda e Taib (HUDA; TAIB, 2013) propuseram um sistema de identificação de defeitos térmicos inteligentes, visando utilizar os conceitos de redes neurais artificiais e modelos estatísticos para detectar a existência de defeitos dentro do equipamento pelo monitoramento de suas condições térmicas. Os resultados foram comparados com análises anteriormente coletadas. A rede neural proposta apresentou uma melhoria de 82,40% comparada ao antigo método de detecção.

Observa-se que, com o desenvolvimento da computação e o aumento do poder computacional, percebeu-se o crescimento de muitas pesquisas que utilizam câmeras termográficas e processamento digital de imagens (PDI), seja por técnicas de inteligências artificial, redes neurais ou, simplesmente, algoritmos de PDI. Essas técnicas tem se apresentado promissoras na detecção de falhas ocasionadas por pontos quentes em equipamentos e conexões elétricas (ULLAH *et al.*, 2017), (JADIN; TAIB *et al.*, 2012), (NICOLA *et al.*, 2018). Nas pesquisas correlatas, foram encontrados diversos artigos utilizando técnica semelhantes de monitoramento e reconhecimento de pontos quentes na rede.

Outro projeto semelhante, porém com outra abordagem de captura de dados é a utilização de drones, também denominados *unmanned vehicle aerial* (UVA), capazes de realizar a vistoria e inspeção das redes elétricas de transmissão de forma automática através, novamente, do processamento digital de imagem. Todavia, nessa abordagem, o veículo se locomove e captura as imagens de forma autônoma, não sendo necessário o deslocamento da equipe de inspeção (MATIKAINEN *et al.*, 2016).

Todavia, em uma perspectiva diferente, os pesquisadores Nicola *et al* (NICOLA *et al.*, 2018) estão desenvolveram um sistema de monitoramento de temperatura dos enrolamentos do transformador de potência da rede elétrica utilizando sensores em fibra óptica. A proposta resume-se em desenvolver uma plataforma online utilizando o software LabView® integrado com o sistema de Supervisão Controle e Aquisição de Dados (SCADA). O sistema irá realizar aferições automáticas e periódicas e apresentar a variação da temperatura no equipamento. Entretanto, diferente dos outros projetos, o sistema em

questão utiliza fibra óptica para determinar a temperatura do enrolamento. Segundo o artigo, o princípio de operação é baseado na variação de espectro de absorção do cristal semiconductor GaAs em relação a temperatura. O GaAs possui um espectro de absorção na região do infravermelho, todavia com o aumento da temperatura o espectro de absorção é alargado, alterando o feixe refletido pelo cristal.

Os pesquisadores Liu *et al* (LIU *et al.*, 2019) propuseram um sistema de aferição de temperatura em enrolamentos de transformador de potência, para isso o grupo de pesquisa utilizou o efeito do espalhamento Raman em fibra óptica para realizar o sensoramento. Nesse projeto os pesquisadores utilizaram um laser pulsado, um acoplador óptico e um fotodetector para determinar a temperatura em diversos pontos do enrolamento. O princípio de operação do sensor utiliza os conceitos do espalhamento contra-propagante e do optical time domain reflection (OTDR) para determinar a temperatura do enrolamento. O projeto proposto obteve uma sensibilidade de 1°C nas aferições de temperatura e um erro máximo da posição do ponto quente de 1 metro. Entretanto, a solução proposta possui custo elevado, pois para gerar efeitos não-lineares é necessário utilizar fontes de luz de alta potência, tornando a operação onerosa.

Já os pesquisadores Praveen *et al*, propuseram um sistema de monitoramento de pontos quentes em enrolamentos de transformadores de potência utilizando grade de Bragg em fibra, Fiber Bragg Grating (FBG). O princípio de funcionamento do sensor baseava-se na reflexão do comprimento de onda de Bragg (λ_B), que varia de acordo com a temperatura do enrolamento. (KASINATHAN *et al.*, 2012) Observa-se nesse projeto a proximidade da pesquisa com o tema proposto nesse trabalho, haja vista que o sensor utilizado para realizar as aferições de temperatura são, em ambos os trabalhos, baseados na reflexão do comprimento de onda de Bragg. Todavia, o projeto proposto por Praveen *et al* utiliza um Optical Spectrum Analyser (OSA) para realizar as aferições de temperatura no enrolamento do transformador, onerando de forma substantiva o custo da solução.

Diante das pesquisas correlatas, observou-se que há diversas pesquisas e trabalhos da comunidade acadêmica para sanar um problema dos setores de transmissão e distribuição de sistemas elétricos e industriais. Desde sistemas autônomos que utilizam imagens termográficas para identificar, reconhecer e alertar às centrais de controle sobre o surgimento de pontos quentes, utilizando redes de sensores, redes neurais e inteligência artificial, como também o uso de drones portando câmeras termográficas para realizar a inspeção em toda a rede de transmissão elétrica de forma automática. Todavia, nenhum projeto proposto utilizou grade de Bragg em fibras ópticas para realizar o monitoramento de pontos quentes em conexões elétricas. Principalmente, quando há o uso de uma configuração óptica que não necessite de um analisador de espectro óptico, ou seja, um OSA. Além disso, diferentemente dos drones com câmeras termográficas, o sistema proposto poderá atuar em ambientes de dutos subterrâneos ou em ambientes internos da subestação

realizando o monitoramento constante, não dependendo do deslocamento de técnicos da concessionárias. Diante disso, observa-se que o tema proposto neste trabalho possui relevância para comunidade acadêmica.

2.2 Sensores em Fibra Óptica

O sensoramento óptico consiste em uma tecnologia que utiliza os princípios e propriedades da luz para mensurar os valores de grandezas do meio ambiente. Atualmente, o uso de sensores ópticos está se tornando cada vez mais comum na sociedade, esse crescimento é consequência de dois fatores, o primeiro devido as diversas vantagens que os sensores ópticos possuem quando comparadas com os sensores tradicionais, e o segundo é referente à infinidade de características que os sensores ópticos são capazes de mensurar. (SABRI et al., 2013)

As principais vantagens dos sensores ópticos quando em análise junto aos sensores tradicionais são: maior sensibilidade, são dispositivos dielétricos, imunidade a interferência eletromagnética (EMI, do inglês Electromagnetic Interference), imunidade a interferência de rádio frequência (RFI, do inglês Radio Frequency Interference), capacidade de multiplexação, podem ser aplicados em altas tensões, altas temperaturas, em ambientes corrosivos, ou ambientes de combustão, podem ser conectados com sistemas de comunicações de dados, entre diversas outras vantagens. Além disso, outro motivo para o crescimento do uso de sensores ópticos é sua diversidade e flexibilidade. Atualmente, existem sensores ópticos capazes de mensurar propriedades físicas, tais como: pressão, temperatura, posição, tração, variações químicas, fluxo de campos elétricos e magnéticos, vibração nível de luz, radiação, entre outros. (YU; YIN; RUFFIN, 2006)

Em conjunto, esses dois fatores levaram os sensores ópticos aos mais diversos campos da ciência. Para a indústria de petróleo e gás, os sensores ópticos, principalmente as FBG, se tornaram uma solução viável. Haja vista que, como as FBGs são elementos passivos na rede, ou seja, não dependem de energia elétrica para realizar o sensoramento do ponto, podem ser submetidas à ambientes críticos, com risco de explosões, sem riscos na operação do sensor (ZHONG; ZHI; YI, 2007)(SNELDERS; BOERSMA, 2014).

Na medicina, os sensores biomédicos e bioquímicos que utilizam, principalmente, os conceitos de absorção e fluorescência são muito utilizados para detecção de doenças e exames laboratoriais para identificar a presença de certas moléculas. Ainda no campo da medicina, as FBGs estão sendo aplicadas em agulhas que realizam o tratamento de veias do globo ocular, devido a necessidade de medir a força aplicada durante o procedimento médico. Devido à sensibilidade das FBGs, a pesquisa conseguiu relatar forças na ordem de 0,5 mN.(GIJBELS et al., 2015) Outra pesquisa semelhante, utiliza as FBGs para medir contrações musculares abdominais através de uma catéter. (ARKWRIGHT et al., 2011)

Para engenharia civil, os sensores ópticos são capazes de aferir e monitorar a qualidade de estruturas de concreto, edifícios, pontes e outras obras da engenharia. Nesse caso, as FBGs auxiliam no monitoramento da saúde das estruturas, medindo tração, pressão e outras características da estrutura. Esses sistemas de monitoramento podem ajudar a prevenir acidentes e custos com manutenção.([QIU et al., 2013](#))

Outra importante aplicação para os sensores ópticos está contida dentro da indústria de transportes, desde de aviões, metrô até navios, aeronaves espaciais, o uso de sensores ópticos para monitorar as grandezas físicas de tração, temperatura e pressão do ar são importantes para assegurar as vidas dos passageiros. As FBGs são uma excelente solução haja vista a capacidade de multiplexar diversos sensores em uma mesma fibra óptica e, também, são leves e ocupam um pequeno volume.

Na engenharia elétrica, os sensores ópticos possuem diversas aplicações, desde utilização em transformadores de potência (TP) ou transformadores de corrente (TC), como também no monitoramento de pontos quentes em conexões elétricas, também podem ser utilizados para monitorar hélices de geradores eólicos, entre outras aplicações. ([SABRI et al., 2013](#)) Nesse contexto, observa-se as inúmeras aplicações dos sensores ópticos no mercado e na indústria. Esse crescimento é consequência das diversas vantagens apresentadas nos sensores ópticos quando comparadas aos sensores elétrico/eletrônicos.

Como observado, os sensores ópticos possuem uma infinidade de aplicações nas mais diversas áreas da ciência. E, devido as vantagens inerentes deste tipo de sensores, essas aplicações tendem a aumentar cada vez mais, saindo do campo da pesquisa científica e adentrando em aplicações para o mercado e a indústria.

2.2.1 Grades de Bragg em Fibra Óptica

Em 1978, os pesquisadores Ken Hill *et al*, do Centro Canadense de Pesquisa em Telecomunicações, perceberam que fibras de sílica dopadas com germânio reagem através da sensibilidade a irradiação de uma luz de argônio. A partir daí, iniciou-se o estudo de criar padrões de ranhuras no índice de refração de fibras ópticas para desenvolver pesquisas com grades de Bragg em fibra.

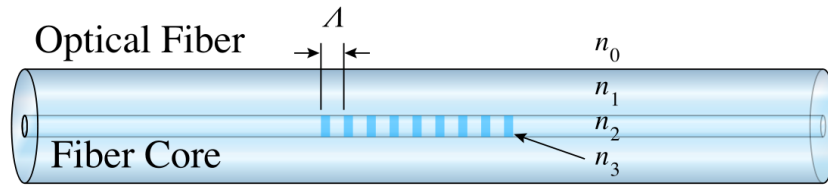
As FBGs são dispositivos ópticos capazes de realizar o sensoriamento de grandezas físicas como temperatura, pressão, tração, peso, umidade, entre outras grandezas. Devido as suas características, as grades de Bragg em fibras ópticas tem se destacado em comparação aos outros sensores, pois possui alta precisão, tamanho reduzido e possui a capacidade de multiplexar diversos sensores em uma mesma fibra óptica. Em consequência, atualmente existem diversas áreas de aplicações para este tipo de sensor, atuando desde monitoramento de pontes e edifícios até medidores de pressão para aeronaves modernas. ([KASHYAP, 2009](#))

As FBGs se caracterizam por ser um elemento de sensoriamento o qual é composto de uma fibra óptica com modulação no índice de refração. A modulação do índice de refração consiste em uma variação periódica do núcleo da fibra. Essa característica permite ao dispositivo agir como um filtro óptico, refletindo parte do espectro luminoso de transmissão, centrado no comprimento de onda de Bragg (λ_B), dado pela expressão abaixo,

$$\lambda_B = 2n_{eff}\Lambda, \quad (2.1)$$

onde n_{eff} representa o índice de refração efetivo da fibra óptica e Λ representa o período da grade (KASHYAP, 2009). Na Figura 1 é apresentado a seção longitudinal de uma FBG. Nela, é possível observar as variações do índice refração do núcleo da fibra. Outra característica importante apresentada na imagem é dada pelo período da grade, representado por Λ . Observa-se que, pela Equação (2.1), o comprimento de onda de reflexão de Bragg (λ_B) é diretamente proporcional ao período da grade (Λ).

Figura 1 – Grade de Bragg em fibra óptica

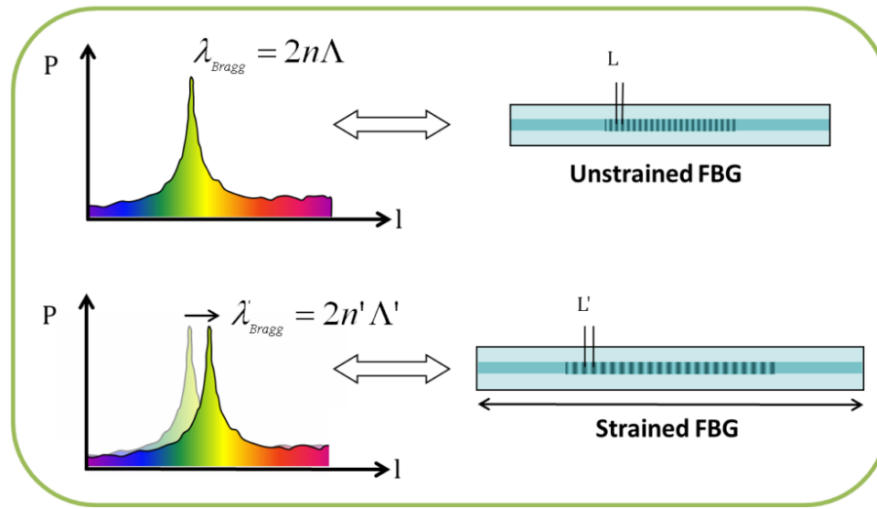


Fonte: Wikipedia - Fiber Bragg Grating

Em outras palavras, qualquer variação no espaçamento entre as grades irá alterar o comprimento de onda de Bragg de reflexão. Essas variações podem ser efetuadas através da deformação longitudinal da fibra, provocada por tração, pressão, ou temperatura. É importante salientar que, além das deformação mecânica, outros fenômenos tais como efeito fotoelástico devido a variações radiais na fibra e dependência do índice de refração com a temperatura, alteram o valor do índice de refração efetivo do núcleo da fibra (n_{eff}).

Observa-se, então, que o princípio de funcionamento das FBGs é consequência de ações externas na fibra óptica, ou seja, o meio estará agindo sobre as grades aumentando, ou diminuindo, o período da grade (Λ). Seja por temperatura, tração, pressão ou algum sistema que modifique essa característica. O resultado analisado demonstra que o comprimento de onda do sinal refletido será proporcional a deformação na fibra óptica. Na Figura 2 é apresentada o deslocamento do comprimento de onda de Bragg de reflexão em resposta à expansão do período da grade ocasionada por uma tração externa na FBG. Observa-se que, em consonância com a Equação (2.1), a variação do período da grade modifica o comprimento de onda de Bragg.

Figura 2 – Análise da Reflexão e Transmissão de uma FBG



Fonte: FBGS.com

É importante ressaltar que, as grades de Bragg se diferem em diversas características, tais como: comprimento de reflexão de Bragg (λ_B), tipo de fibra óptica utilizada, comprimento da grade (L), largura de banda do sinal refletido, ou seja o FWHM (*Full Width Half Maximum*), refletividade do sinal quando a condição de Bragg é satisfeita. Essas características determinam como será o funcionamento da grade aplicada a uma função específica. (KASHYAP, 2009)

O FWHM da grade de Bragg determina a largura do espectro, centrado no comprimento de onda de Bragg (λ_B), que será refletido do pulso de entrada. Essa característica é importante por que quanto mais estreito a largura do pulso refletido, maior será a precisão do sensor óptico. Em contrapartida, são necessários dispositivos ópticos mais caros e complexos para realizar a análise dessas grades.

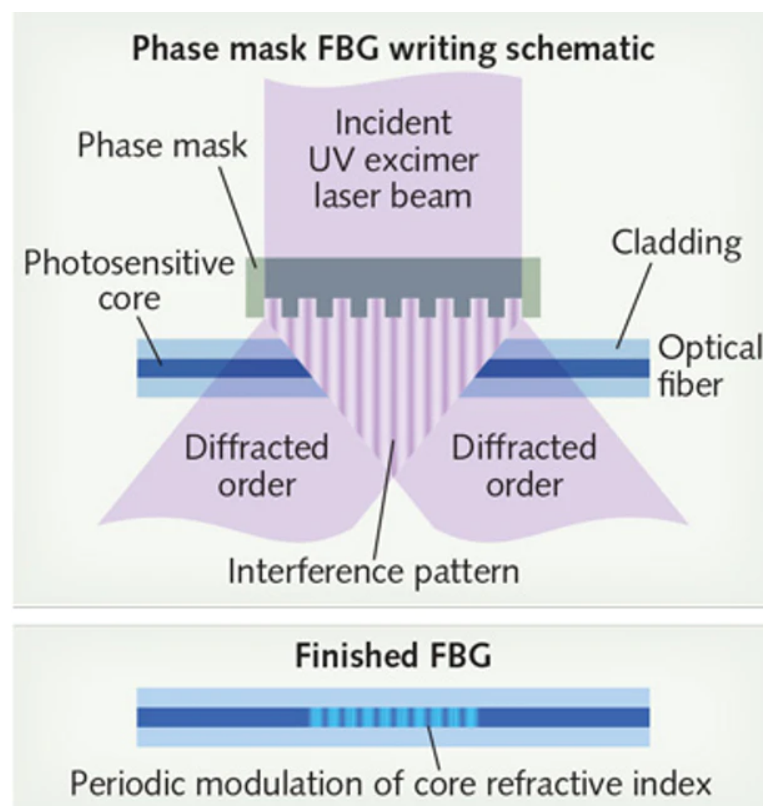
2.2.2 Processo de Fabricação de FBGs

Segundo o livro *Fiber Bragg Grating*, escrito por Raman Kashyap (KASHYAP, 2009), existem diversas maneiras de realizar a fabricação de grades de Bragg inscritas em fibras ópticas. De início, é importante ressaltar que, em geral utiliza-se fibras ópticas dopadas com Germânio, elemento químico fotossensível a radiação no espectro do ultravioleta (UV). Entretanto, de maneira ampla e genérica, existem apenas duas técnicas para inscrever grades em fibras ópticas: com uso de holografia e aquelas que não usam interferometria. Haja vista que, a grande maioria das técnicas de fabricação de grades de Bragg em fibra óptica fazem uso da interferometria para criar padrões em fibra.

A primeira técnica utiliza uma fonte de luz na região do espectro UV (Ultravioleta), um divisor de feixe e a interferometria para inscrever as grades na região da fibra. Observa-

se que, os átomos de Germânio reage ao bombeamento da fonte luminosa para alterar o índice de refração onde haja exposição direta da luz. Existem diversas outras técnicas semelhantes que utilizam o mesmo princípio de interferometria, todavia com algumas alterações. Ultimamente, muitos pesquisadores incluíram o uso de máscaras de fase para realizar ranhuras periódicas em fibras ópticas, melhorando a eficiência da fabricação de novas grades. Na figura 3 é apresentada um esquemático da técnica de inscrição de FBGs por máscara de fase. Observa-se que, a máscara de fase cria padrões de interferências na superfície da fibra, essa exposição reage com os átomos de Germânio criando uma variação no índice de refração da fibra óptica. (KASHYAP, 2009)

Figura 3 – Máscara de Fase para Confecção de FBGs



Fonte: Solphotonics.nl

Já na segunda técnica, utiliza-se de LASERs (Light Amplified by Stimulated Emission of Radiation) pulsados que inscrevem, ponto a ponto, ranhuras na fibra. Nesta técnica, as fibras se movimentam enquanto o LASER continua fixo. Enquanto a fibra passa por uma irradiação intensa, haverá alteração do seu índice de refração no ponto, criando ranhuras periódicas. (KASHYAP, 2009)

2.2.3 Análise da Variação da Temperatura em FBGs

Como mencionado anteriormente, o princípio de funcionamento de uma FBGs consiste na reflexão do comprimento de onda de Bragg (λ_B). Este, por sua vez, apresenta-se

como uma variável dinâmica que depende da perturbação na fibra, que pode se apresentar como um estresse por tração e/ou temperatura. Entretanto, como o objetivo deste trabalho é desenvolver um sensor de temperatura para aplicações em conexões elétricas para monitoramento de pontos quentes, neste caso não será observada as variações do comprimento de onda de Bragg em função da tração longitudinal na fibra óptica. Em outras palavras, será realizado uma análise matemática da relação do deslocamento do comprimento de onda de Bragg em relação apenas a temperatura.

Para obter a dependência da temperatura da grade, é necessário realizar a diferenciação da Equação (2.1) em função da temperatura,

$$\frac{d\lambda_B}{dT} = 2 \cdot \left(\frac{dn_{eff}}{dT} \cdot \Lambda + n_{eff} \cdot \frac{d\Lambda}{dT} \right) \quad (2.2)$$

Da Equação (2.2) é possível aplicar simplificações utilizando a Equação (2.1). Considerando o exposto, obtém-se que,

$$\frac{d\lambda_B}{dT} = \lambda_B \cdot \left(\frac{dn_{eff}}{n_{eff}dT} \cdot \Lambda + n_{eff} \cdot \frac{d\Lambda}{\Lambda dT} \right) \quad (2.3)$$

De acordo com a Equação (2.4), representando a variação do índice de refração induzido pela temperatura Δn_{eff} ,

$$\Delta n = n_{eff} \cdot \frac{dn_{eff}}{n_{eff}dT} \cdot \Delta T = n \cdot \xi \cdot \Delta T \quad (2.4)$$

onde ξ representa o coeficiente termo-óptico da fibra e ΔT consiste na variação de temperatura. Analogamente, considerando a Equação (2.5) que representa variação do período da grade, observa-se que,

$$\Delta \Lambda = \Lambda \cdot \frac{d\Lambda}{\Lambda dT} \cdot \Delta T = \Lambda \cdot \eta \cdot \Delta T \quad (2.5)$$

onde η representa o coeficiente de expansão termo-óptico, ou seja, o quão sensível a fibra é a variação de temperatura.

Considerando as equação apresentadas (2.4) e (2.5). É possível substituir os valores do coeficiente termo-óptico do índice de refração da fibra e do coeficiente de expansão termo-óptico da fibra. Considerando o exposto, encontra-se,

$$\Delta \lambda_B = \lambda_B \cdot (\xi + \eta) \cdot \Delta T \quad (2.6)$$

Em geral, é possível considerar o coeficiente de expansão térmico η e o coeficiente termo-óptico ξ são, aproximadamente, $0,55 \cdot 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ e $8,6 \cdot 10^{-6} / ^\circ\text{C}$, respectivamente,

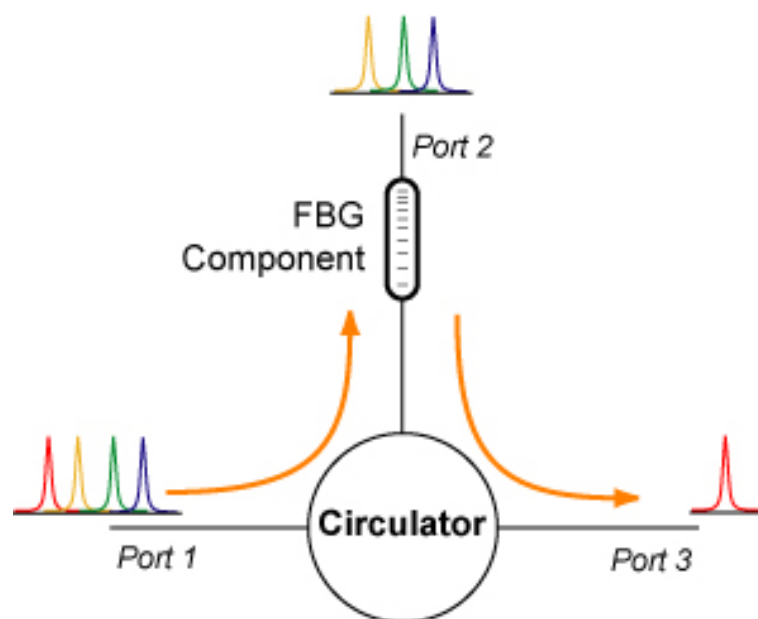
para fibras dopadas com germânio. Considerando o exposto, pode-se aplicar os valores especificados na Equação (2.6) para determinar a sensibilidade da fibra a variação de temperatura de 1°C . O resultado obtido é uma sensibilidade de $7,33 \text{ pm}/^{\circ}\text{C}$.

2.3 Circuladores Ópticos

Segundo a fabricante de dispositivos ópticos Thorlabs, os circuladores ópticos são dispositivos não recíprocos, direcionais e de três portas, que são usados em uma ampla gama de configurações ópticas e para inúmeras aplicações. Funcionando para configurações de dispositivos de telecomunicações, tais como separador de canais DWDM (do inglês, Dense Wavelength Division Multiplexing), multiplexação de canais, sensores ópticos, entre outras aplicações. (THORLABS, 2019a)

O princípio de funcionamento do circulador óptico baseia-se na seguinte premissa, Um sinal óptico acoplado na porta 1 é encaminhado para a porta 2. Entretanto, quando um sinal óptico é injetado na porta 2, o pulso luminoso é integralmente encaminhado para a porta 3. Todavia, quando um pulso luminoso é injetado na porta 3, o sinal sofre uma grande atenuação e não é encaminhado para nenhuma das outras portas do circulador. Em outras palavras, é possível inferir que os circuladores ópticos possuem características diretivas, ou seja, possuem uma direção de propagação. Haja vista que, quando um pulso luminoso é injetado na porta 1, o mesmo será encaminhado para a porta 2, entretanto a recíproca não é verdadeira. Quando um pulso é injetado na porta 2, o pulso será direcionado para a porta 3, contrariando o sentido da direção (THORLABS, 2019a).

Figura 4 – Circulador óptico com FBG



Fonte: Thorlabs.com

Na Figura 4 é apresentado um exemplo de aplicação de circuladores ópticos com FBGs. Na entrada do circulador, na porta 1, é acoplado um pulso de banda larga, com vários comprimentos de ondas exemplificados por cores, ao ser injetado na porta 1, seguindo o princípio de funcionamento do circulador óptico, o pulso é encaminhado para a porta 2. Entretanto, na porta 2 há a presença de uma grade de Bragg em fibra. Considerando o princípio de funcionamento da FBG, parte do pulso de banda larga será transmitido para a extremidade da fibra óptica e parte será refletido, retornando para a porta 2 do circulador. Como mencionado, quando a condição de reflexão de Bragg é aceita, o pulso refletido irá retornar em direção a porta 2 do circulador. Logo, o pulso luminoso injetado na porta 2 do circulador óptico, será encaminhado para a porta 3. Observa-se que, embora há diversas aplicações para o circuito apresentado acima. O objetivo do exemplo é realizar a separação de canais ópticos DWDM.

É importante observar que, como os circuladores ópticos são elementos ópticos passivos, ou seja, não utilizam energia elétrica em seu funcionamento, dessa forma eles não são capazes de direcionar os feixes luminosos de forma automática. Consequentemente, quando aplicados em sistemas com sensores ópticos, em geral, utilizam-se configurações ópticas que aproveitem seu modo de funcionamento de tal forma que seja possível analisar a resposta do sensor. Em aplicações com FBGs, a fonte luminosa de espectro largo é inserido na porta 1. Esse feixe de luz é encaminhado para porta 2, onde haverá uma FBG conectada. Em seguida, considerando o funcionamento das FBGs, haverá um feixe refletido pela grade de Bragg em direção a porta 2. Dessa forma, apenas o comprimento de onda de Bragg refletido será encaminhado para porta 3, evitando interferências e ruídos na análise do feixe luminoso.

Devido ao seu alto isolamento e baixa perda de inserção, os circuladores ópticos são amplamente utilizados em sistemas de comunicação avançados como multiplexadores de adição/queda, bombas bidirecionais e dispositivos de compensação de dispersão cromática. Além disso, os circuladores são usados em transmissão bidirecional em fibra e serve para injetar ou extrair sinais sendo transmitidos em sistemas de comunicações ópticas. Estes componentes operam em comprimentos de onda bem definidos e com uma banda da ordem de 20 a 30 nm.

2.4 Dispositivos Optoeletrônicos

2.4.1 Transmissores Ópticos

Os transmissores ópticos possuem um papel fundamental em comunicações ópticas, sua função é converter os sinais elétricos de entrada de dispositivos de comunicação para pulsos de luz, acoplando-os à fibras ópticas. Os principais componentes utilizados como fonte óptica são: Diodos Emissores de Luz, também denominados LEDs (Light

Emitting Diode), e os LASERs, da sigla Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation. Isso se deve ao fato de que estes possuem tamanho compacto, alta eficiência, boa confiabilidade, faixas de comprimento de onda bem definidas, possibilidade de modulação direta, entre outras características ([AGRAWAL, 2012](#)).

2.4.2 LEDs

Os LEDs consiste em um dispositivo semicondutor que quando polarizado diretamente emite radiação luminosa. Essa radiação é produzida através da emissão espontânea, um fenômeno denominado eletroluminescência. A luz produzida pelos LED é incoerente e, em geral, possuem uma largura de banda relativamente grande, entre torno de 30 nm à 60 nm. Suas principais aplicações estão contidas na eletrônica, sistemas de comunicações ópticos e sensores ópticos. Haja vista que, é uma fonte de luz com custo baixo e possui maior durabilidade ([AGRAWAL, 2012](#)).

Como mencionado, os LEDs possuem um espectro de emissão largo, ou seja, possuem alta largura de banda. Essa característica inclui os LEDs como fonte de luz de banda larga e são interessantes para aplicações em FBGs ([AGRAWAL, 2012](#)).

2.4.3 LASERs

O LASER é um dispositivo semicondutor que emite luz através de um processo óptico de amplificação baseada na emissão estimulada. Esse fenômeno permite que o LASER possua características de uma fonte de luz coerente, convergente e com largura de banda estreita, quase monocromática. Entretanto, essas características tornam-o um dispositivo com custo alto e específico para aplicações que necessitem de largura de banda estreita. Outra característica importante dos LASER é que estes possuem alta potência luminosa, podendo ser utilizados para transmissões ópticas de longa distância e para produzir efeitos não-lineares em fibra. ([AGRAWAL, 2012](#))

2.4.4 Fotodiodo

O fotodiodo consiste em um dispositivo opto-eletrônico que realiza a conversão do feixe óptico em corrente elétrica. Essa corrente elétrica é gerada quando fótons são absorvidos no fotodiodo. Sua principal função é realizar uma interface entre a tecnologia óptica e a tecnologia eletrônica, tornando possível a criação de sensores ópticos, comunicação óptica, ferramentas ópticas, entre outras. Haja vista que, muitos equipamentos de telecomunicações ainda operam apenas no domínio elétrico ([THORLABS, 2019b](#)).

Em sensores ópticos, os fotodiodos são utilizados para realizar a conversão da energia luminosa do feixe óptico em energia elétrica. Essa conversão se faz necessária, uma vez que, o processamento do sinal elétrico é realizado pelo uso de microcontroladores e

microprocessadores que atuam apenas no domínio elétrico. Dessa forma, os dispositivos fotosensíveis consistem em uma ferramenta essencial, tornando possível a integração entre dispositivos ópticos e dispositivos elétricos.

Em geral, os fotodiodos são constituídos de um material semi-condutor, podendo ser de gálio, arseneto de índio e gálio (InGaAs), fosfeto de gálio (GaP) ou tradicionais como os materiais de silício (Si) e fotodiodos de germânio (Ge). A presença do elemento químico no fotodiodo determina a faixa do comprimento de onda que o fotodiodo irá atuar. Em geral, os fotodiodos de GaP são utilizados para detecção de presença luminosa na região do UV, de 150 nm a 550nm. Já os fotodiodos baseados em InGaAs oferecem uma faixa na região de trabalho de 900 nm a 2600nm, são ideais para aplicações em telecomunicações.

$$R(\lambda) = \frac{I_{PD}}{P_{input}}, \quad (2.7)$$

na Equação (2.7) é apresentada a responsividade de um fotodiodo. Uma das principais características de um sensor óptico que utiliza-se de um fotodiodo consiste no termo responsividade. A responsividade de um fotodiodo, em geral dada em R, caracteriza a performance e a qualidade do dispositivo para determinada aplicação. É dada pela razão da fotocorrente gerada I_{PD} pela potência óptica incidente P_{input} num dado comprimento de onda (THORLABS, 2019b).

2.4.5 Interrogadores Ópticos

Os interrogadores ópticos, também conhecidos como sistema de aquisição de dados, são instrumentos opto-eletrônicos que permitem realizar leituras ópticas dos sensores FBGs. Um interrogador é capaz de medir uma rede de sensores FBGs multiplexados em uma mesma fibra óptica, fazendo medidas de diversas características, tais como: tração, pressão, temperatura, aceleração, entre outras. Para isso, o interrogador óptico utiliza as características da onda eletromagnética para analisar e medir as variações de suas grandezas..(YIN; RUFFIN, 2006)

O conceito de interrogar uma FBG consiste na ação de receber o espectro de reflexão do sensor FBG, ou seja, o comprimento de onda de Bragg refletido, e analisar o resultado. Em geral, esses resultados utilizam os parâmetros de frequência, amplitude e fase dos feixes luminosos refletidos e, posteriormente, converte-os, por meio de equações de calibração, para unidades de grandezas conhecidas, tais como: Newton (N), Pascal (Pa), Celsius (°C), entre outras unidades.(YIN; RUFFIN, 2006)

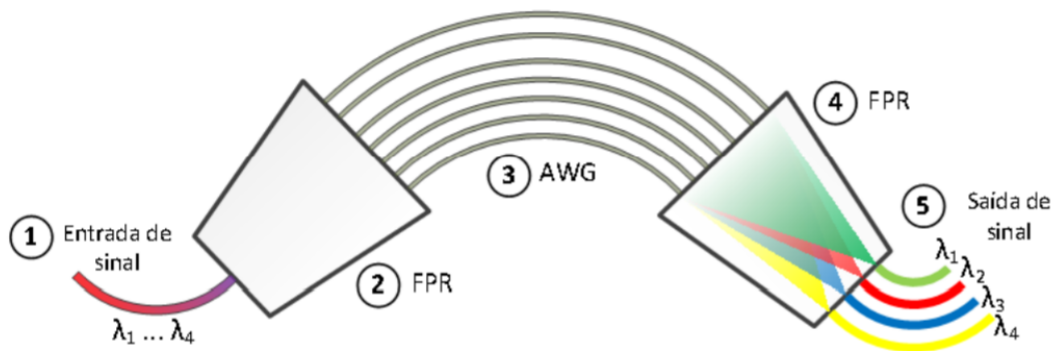
Atualmente, existem diversas formas de realizar a interrogação de um sensor FBG, alguns utilizam elementos passivos para realizar a análise do pulso refletido e outros utilizam elementos ativos, ou seja, elementos energizados, para realizar o resultado do

comprimento de onda de Bragg de reflexão. Em ambos os casos, o resultado é convertido para o domínio elétrico para apresentar os resultados capturados.

2.4.5.1 Interrogador Ópticos Passivos

Um dos processos de interrogação com elementos passivos consiste na demodulação por *Arrayed Waveguide Gratings* (AWG). Esses dispositivos são muito utilizados em sistemas *Dense Wavelength Division Multiplexing* (DWDM) para realizar a multiplexação e demultiplexação dos canais em transmissões ópticas. E, devido ao seu baixo custo, tamanho compacto e aumento na utilização de sensores FBGs, as AWGs começaram a ser utilizadas em diversos sistemas de interrogação. Na Figura 5 é apresentada o esquema de funcionamento de uma rede AWG. Observa-se que, o dispositivo é composto por um canal de entrada e vários canais de saída, duas áreas de livre propagação, denominada FPR (*Free Propagation Region*) e um conjunto de guias de ondas (SHI; BOYD, 2013).

Figura 5 – Array Waveguide Grating - AWG



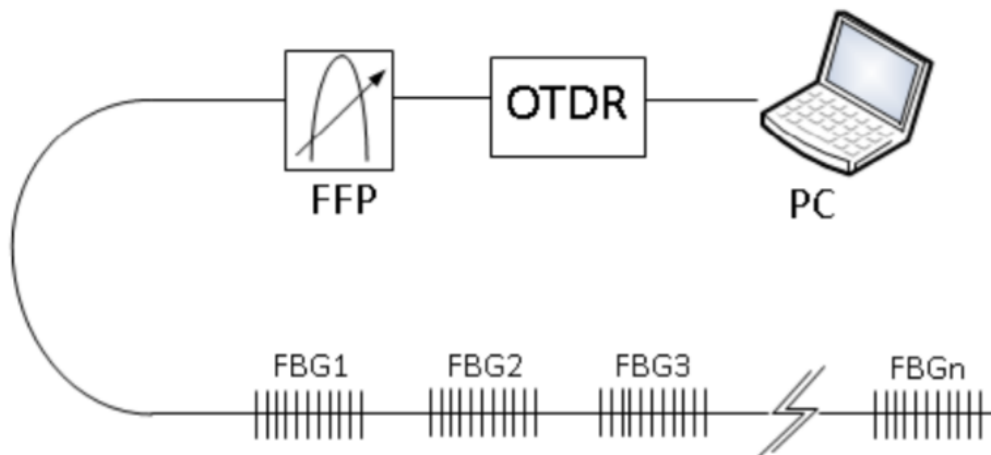
Fonte: (SHI; BOYD, 2013)

Na Figura 5 é possível observar a presença de quatro comprimentos de onda na entrada do dispositivo (λ_1 a λ_4). Após a entrada do sinal, chegando a Região de Livre Propagação, ocorre a difração do sinal óptico, com o objetivo de criar uma cópia do sinal de entrada em cada guia de onda conectado ao primeiro FPR. É importante salientar que, os feixes luminosos percorrem caminhos diferentes em cada guia de onda, essa distinção cria uma diferença de fase no feixes. Em seguida, os feixes atrasados em fase são acoplados ao segundo FPR e, novamente, os feixes ópticos são difratados. Todavia, agora com diferença de fase, os feixes ópticos são capturados com interferência construtiva e separados em canais distintos, demultiplexando o pulso original.

Outro exemplo de interrogação passiva consiste na utilização de um equipamento OTDR (*Optical Time Domain Reflectometer*) e uma fibra óptica com diversos sensores FBGs com o mesmo comprimento de Bragg de reflexão. Nesse caso, os sensores FBGs utilizam o princípio da Multiplexação por Divisão de Tempo (TDM). Dessa forma, através

de medidas da velocidade da luz e o tempo de resposta de cada FBG é possível determinar a resposta de um nó sensor específico. Na Figura 6 é apresentada a configuração de interrogação das grades de Bragg em fibras ópticas utilizando o método de interrogação por multiplexação de divisão no tempo. (VALENTE et al., 2003)

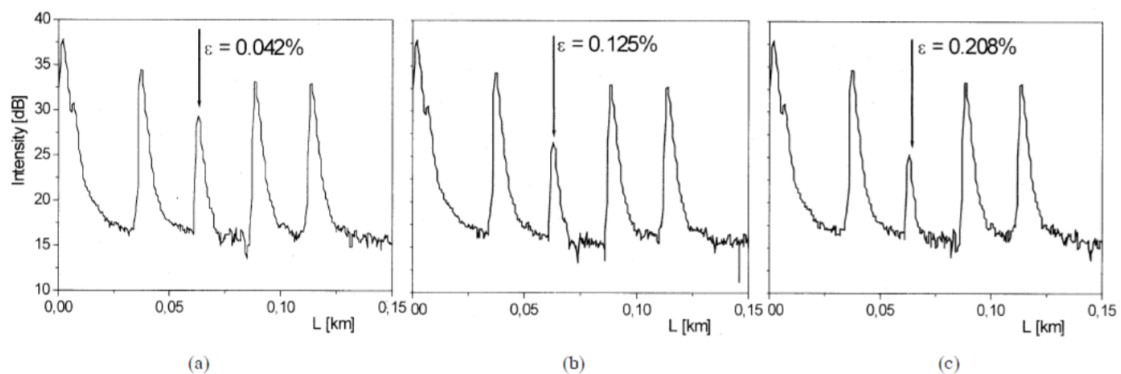
Figura 6 – Interrogação de FBGs utilizando TDM



Fonte: (VALENTE et al., 2003)

Observe que, nessa configuração, as FBGs estão dispostas em série e estão espaçadas no espaço. Devido à essa característica é importante salientar que as FBGs devem possuir características de baixa refletividade. Haja vista que é muito importante que todas as FBGs sejam iluminadas pelo pulso óptico.

Figura 7 – Resposta de 4 FBGs utilizando técnica de TDM. Tração sendo aplicada a 2ª FBG do sistema. (a) tração de 0,042% (b) tração de 0,125% (c) tração de 0,208%



Fonte: (VALENTE et al., 2003)

Na Figura 7 é apresentada a resposta de um interrogador óptico de FBGs utilizando um OTDR. No gráfico são apresentadas quatro FBGs dispostas em série. Nesse experimento

foram realizadas três variações de tração sobre a segunda grade de Bragg do sistema. Observa-se no gráfico apresetado na figura a resposta da FBG às três variações de tração. Além disso, analisando o gráfico, é possível identificar claramente qual das grades está sofrendo a distorção da tração. Caso esse sistema fosse implantado em uma ponte ou edifício seria possível identificar um possível ponto de falha da estrutura apenas analisando os gráficos apresentados.

2.4.5.2 Interrogadores Ópticos Ativos

Existem diversas técnicas que utilizam elementos ativos para realizar a interrogação de sistemas baseados em grades de Bragg. Em geral, as técnicas que utilizam esse tipo de interrogação utilizam filtros sintonizáveis ou técnicas de interferometria.

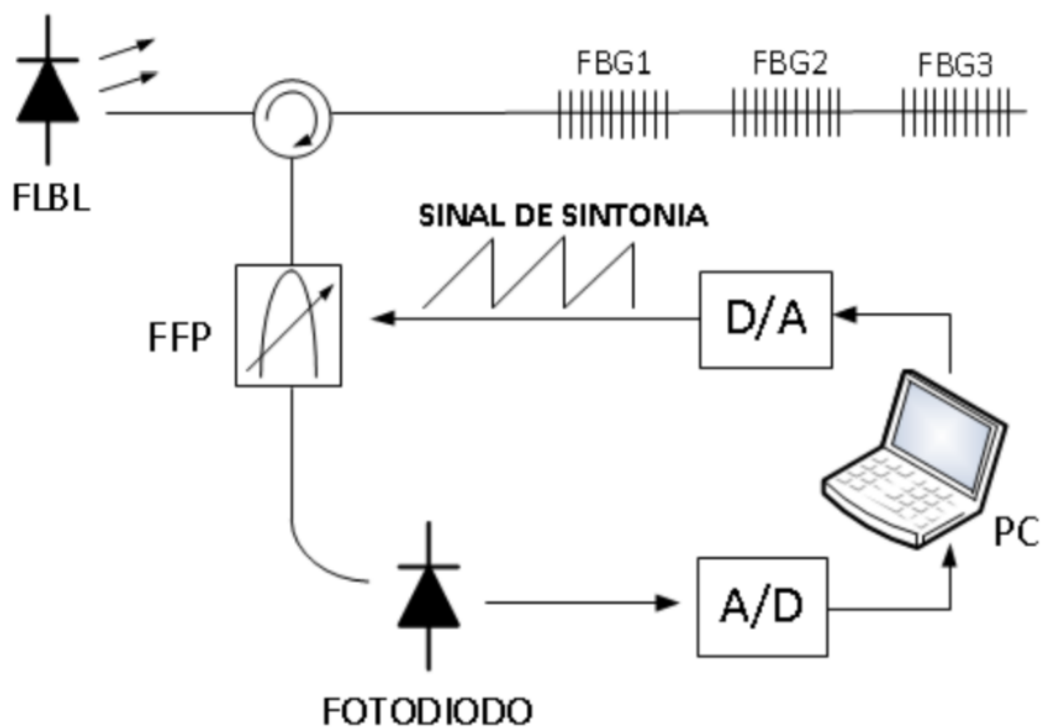
Em interferometria, os dois principais sistemas de demodulação são: Interferômetro de Michelson e Interferômetro de Mach-Zehnder, em ambos os esquemas, a variação do comprimento de onda de Bragg são convertidas em variações de diferença de fase. As demodulações utilizando interferometria possuem alta precisão e respostas rápidas. Entretanto, apresentam as desvantagens de serem susceptíveis à variações de temperatura e vibração e possuem alto custo de operação, o que inviabiliza o uso comercial.

Já em modelos de interrogação com filtros ativos, em geral, utiliza-se os filtros Fabry-Perot (FFP), onde seu modo de funcionamento consiste em alterar a cavidade de ressonância e, conseqüentemente, alterar o espectro óptico de aceitação do sistema. Em geral, a cavidade do filtro de Fabry-Perot são alteradas através de pulsos elétricos em um material piezo-elétrico.([ALLAN et al., 2009](#))

Na Figura 8 é apresentado a configuração de interrogação utilizando um filtro de Fabry-Perot (FFP). O sistema contém uma fonte de luz de banda larga (FLBL), quatro FBGs, um FFP, um fotodiodo e dispositivos microcontrolados. O modo de funcionamento é baseado em utilizar pulsos elétricos do tipo dente de serra para alterar a cavidade de ressonância e, conseqüentemente, a faixa do espectro de aceitação do FFP. Dessa forma, o fotodiodo receberá apenas leituras de parte do espectro em um determinado instante de tempo. O computador, dispositivo que controla o FFP, será responsável por criar os sinais elétricos do tipo dente de serra para controlar o FFP e identificar em qual comprimento de onda o fotodiodo está recebendo aquela potência óptica e, posteriormente, convertê-la para domínio elétrico. Dessa forma, o computador será capaz de identificar instantaneamente em qual espectro óptico aquela potência recebida está contida. Esse esquema de varredura é importante para analisar todos os espectros a cada ciclo do sinal elétrico enviado para o FFP e criar um gráfico para representativo do resultado capturado.([ALLAN et al., 2009](#))

Independente da classificação do interrogador, o princípio básico de qualquer interrogador óptico é analisar os resultados obtidos pela reflexão do comprimento de onda de Bragg. E, posteriormente, apresentar esses resultados de forma inteligível e com baixa

Figura 8 – Interrogação de FBGs utilizando FFP



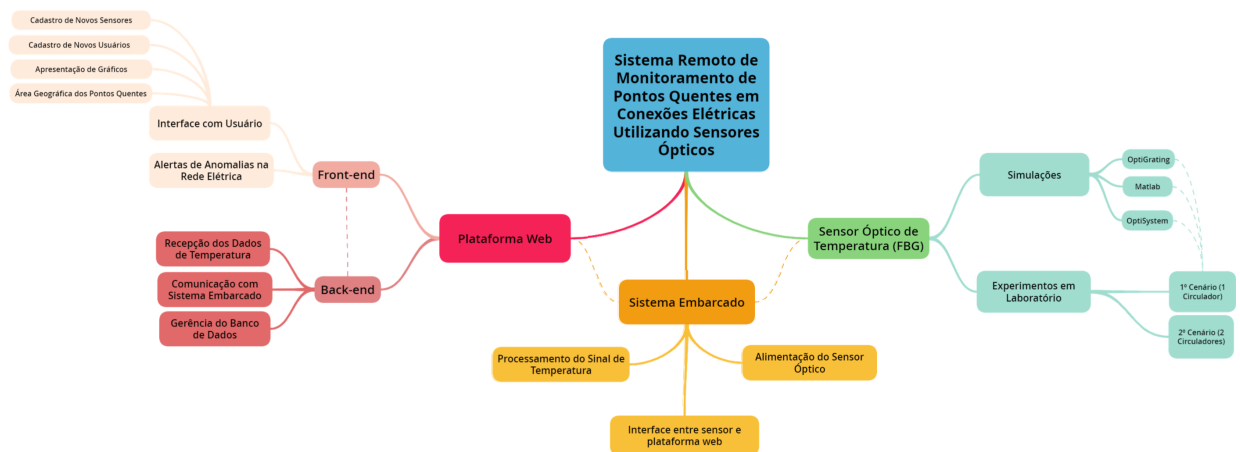
Fonte: (ALLAN et al., 2009)

complexidade para que um usuário consiga entender as respostas apresentadas.

3 Metodologia

Como mencionado no Capítulo 01, o objetivo deste trabalho é desenvolver uma plataforma de monitoramento de pontos quentes em conexões elétricas utilizando sensores ópticos. Todavia, para facilitar a compreensão, o projeto proposto será dividido em três etapas, a primeira aplicada ao desenvolvimento do sensor óptico de temperatura, considerando todos as ferramentas para efetuar aferições de temperatura na conexão elétrica, a segunda será o sistema embarcado que irá processar os dados coletados e enviar para a Internet, e a terceira visando a construção de uma plataforma de monitoramento de pontos quentes, alertando a concessionária em caso de surgimento de alguma anomalia na rede elétrica. Para isso serão utilizadas uma plataforma *web* e um servidor para capturar as informações enviadas pelo sensor óptico. Com o objetivo de facilitar a compreensão do leitor, os temas referentes a construção do protótipo serão abordados separadamente.

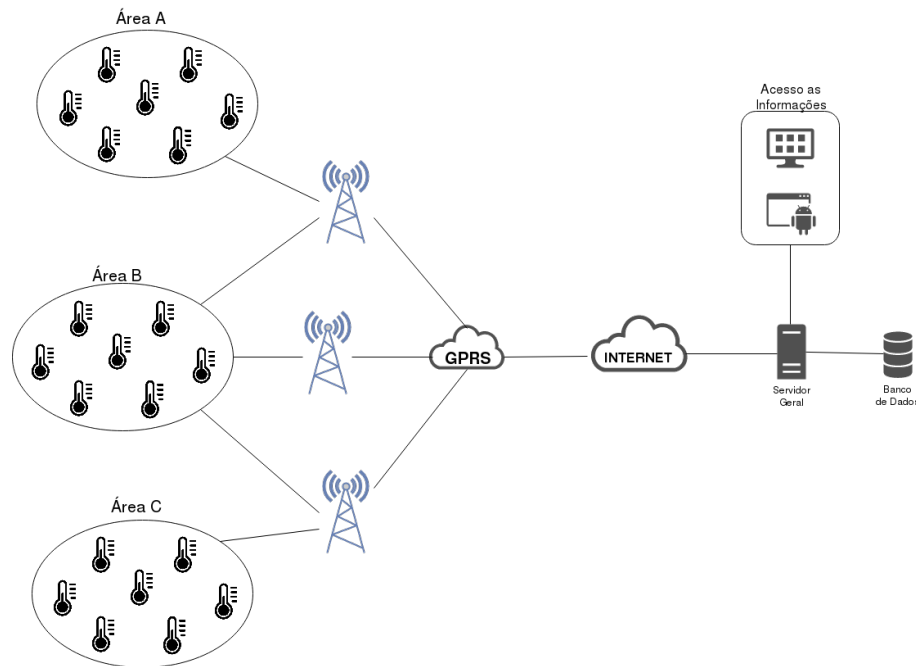
Figura 9 – Mapa mental do projeto proposto



Fonte: Autor

Na figura 9 é apresentado um mapa mental contendo as etapas e subetapas do projeto proposto. Como mencionado, é possível observar que o projeto é composto por três etapas e cada etapa serão desenvolvidas paralelamente, a fim de que o sistema seja concluído em um menor prazo. Na etapa sensor óptico de temperatura serão analisadas as as simulações realizadas e as configurações propostas do sensor. Em sistema embarcado será desenvolvido uma placa eletrônica para realizar o processamento do sinal recebido pelo sensor e a interface com o servidor *web*. A etapa da plataforma *web* será dividida em duas etapas, *front-end* e *back-end*, que irão auxiliar no gerência dos nós sensores, na recepção de dados entre outras funcionalidades.

Figura 10 – Topologia do sistema remoto de monitoramento de pontos quentes



Fonte: Autor

Na Figura 10 é apresentada uma visão geral do projeto proposto neste trabalho. Na imagem é possível observar a presença de uma rede de vários nós sensores instalados na concessionária. Estes sensores irão realizar as aferições de temperatura nas conexões elétricas. Em seguida, os nós conectados a Internet via GPRS enviarão os dados capturados para um servidor *web*, que o organizará utilizando um serviço de banco de dados. Por fim, os dados coletados serão monitorados e apresentados ao técnico responsável da concessionária, que irá realizar o acompanhamento das informações por meio de uma página *web* e, caso haja algum sinistro na rede, acionará a equipe de manutenção para realizar uma manutenção preditiva das conexões sobreaquecidas.

3.1 Sensor Óptico de Temperatura

3.1.1 Simulações no OptiGrating®

Inicialmente, para compreender o princípio de funcionamento das grades de Bragg em fibras ópticas foi utilizado o *software* de simulação OptiGrating®, desenvolvido pela empresa OptiWave®. O OptiGrating® consiste em um ambiente de simulação específico para aplicações que utilizam grades de Bragg em fibras ópticas. Segundo o fabricante, o *software* possui diversas aplicações, atuando em telecomunicações, adicionando e extraindo canais DWDM, para compensadores de dispersão ou até mesmo ganho de amplificadores ópticos, bem como é utilizado para aplicações em sensoriamento óptico.

Para realizar as simulações no programa, foi necessário realizar pesquisas de FBGs ofertadas no mercado e modificar os parâmetros da simulação para adequar aos parâmetros encontrados no mercado. Consequentemente, nas simulações realizadas foram adotadas as seguintes características: fibra óptica SMF-28 (Single Mode Fiber) com o diâmetro do núcleo de $8,2 \mu\text{m}$, diâmetro da casca $125 \pm 0,7 \mu\text{m}$, abertura numérica de 0,14, índice de refração de 1,46 e 1,45 do núcleo e da casca, respectivamente. Além disso, foi utilizado uma grade Bragg com 100 segmentos, 5 cm de comprimento, período de 0.5338, índice de modulação de 0,0001, coeficiente termoóptico de $8,3 \cdot 10^{-6} C^{\circ-1}$ e coeficiente de expansão térmica de $5,5 \cdot 10^{-7} C^{\circ-1}$. É importante ressaltar que, as características inseridas no *software* de simulação são semelhantes as características da grade de Bragg encomendadas para o projeto. Na tabela 1 são apresentados as características da FBG utilizada nas simulações.

Tabela 1 – Características da FBG.

Característica FBG	Dados
Fibra Óptica	SMF-28
Diâmetro Núcleo	$8,2 \mu\text{m}$
Diâmetro da Casca	$125 \pm 0,7 \mu\text{m}$
Abertura Numérica (NA)	0,14
Índice de Refração (Casca)	1,45
Índice de Refração (Núcleo)	1,46
Núm. Segmentos (FBG)	100
Comprimento (FBG)	5 cm
Período (FBG)	0,5338
Índice de Modulação (FBG)	0,0001
Coeficiente Termo-óptico (FBG)	$8,3 \cdot 10^{-6} C^{\circ-1}$
Coeficiente Expansão Termo-óptico (FBG)	$5,5 \cdot 10^{-7} C^{\circ-1}$

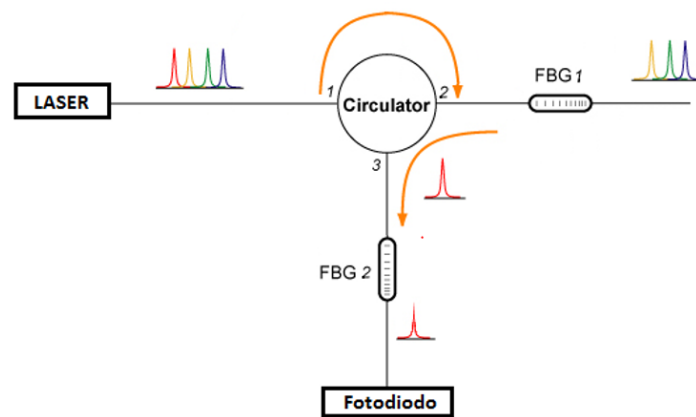
As informações adicionadas no *software* OptiGrating[®] irá apresentar, por meio de simulações, o comportamento das FBGs quando aplicadas à sensoramento de temperatura. Haja vista que, para investir na construção de um sensor é importante prever algumas características de resposta do mesmo, tais como resposta a variação de temperatura, sensibilidade do transdutor óptico, ou seja, menor variação de temperatura perceptível pelo módulo, linearidade do sensor e outras características. Ao final da simulação serão obtidos resultados que irão auxiliar na construção do protótipo proposto neste projeto.

3.1.2 Configuração do Sensor Óptico de Temperatura

Após a validação das características das grades de Bragg para uso em sensoramento óptico de temperatura, iniciou-se o estudo para determinar o melhor sistema de interrogação para realizar as aferições de temperatura na concessionária e, em seguida, quais as características da grade para obter a melhor resposta do sensor. Diante disso, é importante salientar que, o custo do protótipo de sensoramento deve estar alinhado ao

custo da concessionária ao realizar serviços de manutenção e prevenção do surgimento de pontos quentes, pois um alto custo do protótipo inviabilizaria precocemente o sucesso do sistema. Considerando o exposto, optou-se por descartar o uso do analisador de espectros óptico (OSA), haja vista o seu alto valor de compra. Em consequência, optou-se por utilizar uma configuração óptica passiva e de baixo custo para realizar as aferições de temperatura na rede da concessionária contratante. Na Figura 11 é apresentada a configuração óptica do sensor de temperatura proposto. Observa-se que, o sistema irá utilizar uma fonte de luz de banda larga, um circulador óptico, duas FBGs e um fotodiodo. Todos os dispositivos atuarão na região do espectro do infravermelho, em 1550 nm.

Figura 11 – Configuração proposta do Sensor de Temperatura



Fonte: Thorlabs (Adaptada)

Depois da configuração de interrogação definida, iniciou-se um novo estudo para determinar a largura de banda do pulso refletido da grade com o objetivo de obter o melhor resultado do sensor óptico de temperatura. Haja vista que, no projeto em questão, havia a disponibilidade apenas de dois (02) tipos de grades de Bragg, sendo a primeira com largura de banda (FWHM) de 0,3 nm e a segunda com largura de banda (FWHM) de 1,2 nm. Então, para a configuração proposta, será possível criar quatro cenários distintos. Diante disso, foram propostos quatro possíveis configurações do sensor óptico de temperatura.

- Grades Simétricas

- Proposta 01: FBG1 = 0,3 nm / FBG2 = 0,3 nm
- Proposta 02: FBG1 = 1,2 nm / FBG2 = 1,2 nm

- Grades Assimétricas

- Proposta 03: FBG1 = 0,3 nm / FBG2 = 1,2 nm
- Proposta 04: FBG1 = 1,2 nm / FBG2 = 0,3 nm

Considerando o sistema proposto na Figura 11 e a diversidade de FBGs disponíveis em laboratório, foi realizado simulações numéricas com o objetivo de determinar qual sistema forneceria o melhor resultado de sensibilidade do sensor óptico. Para isso, foram desenvolvidas simulações utilizando os ambientes de simulação Matlab® e OptiSystem®.

Essas simulações são importantes pois auxiliam na determinação da sensibilidade de um sensor que é caracterizada pelo coeficiente angular de sua curva em resposta à uma variação na entrada. Em outras palavras, a sensibilidade consiste na mínima entrada do parâmetro físico que cria uma variação detectável na saída. Então, quanto maior a variação da curva, melhor será considerada a sensibilidade do sensor. (NATIONAL INSTRUMENTS, 2019) Consequentemente, é interessante salientar a importância desta característica no transdutor óptico proposto.

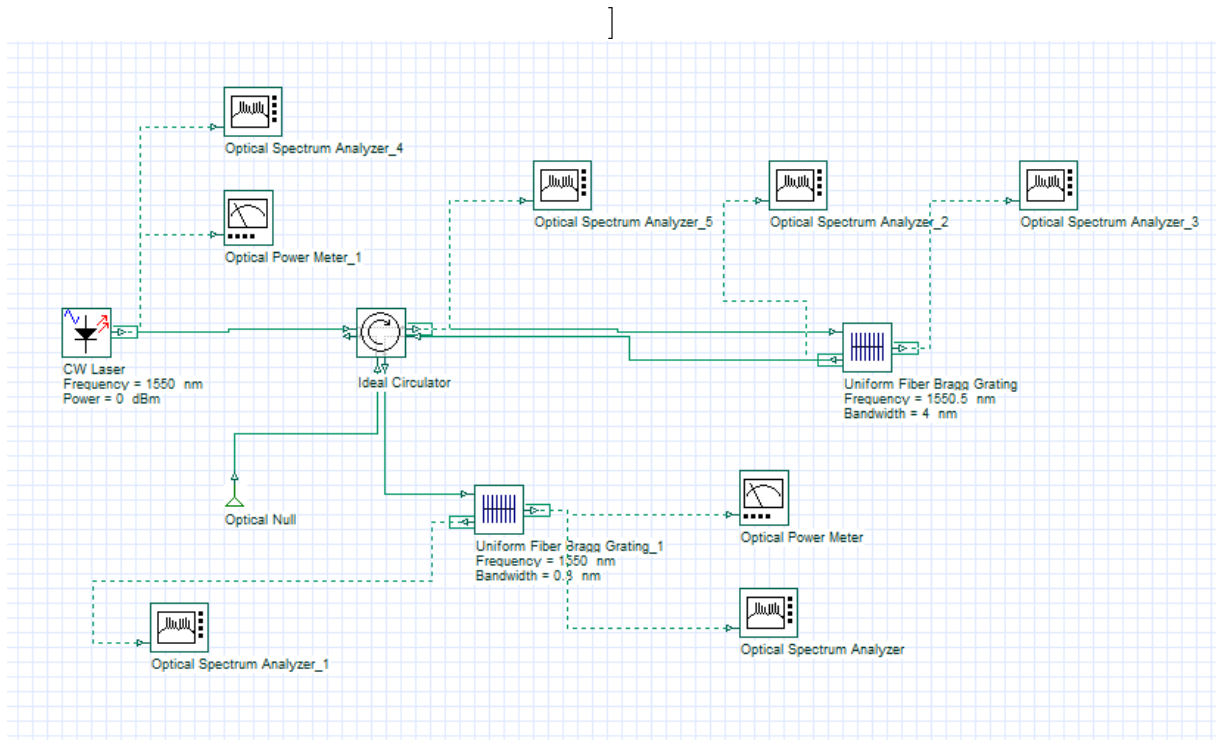
Inicialmente, com o objetivo de validar as características do sensor foi desenvolvido um código em Matlab® que realizava simulações considerando todas as configurações propostas acima. No programa foram adicionadas as características da grade de Bragg adquiridas para o projeto, tais como: tipo de fibra óptica SMF-28, comprimindo de onda de reflexão (λ_B) em 1550 nm, número de segmentos igual a 100 e a largura de banda de acordo com as propostas supracitadas.

Posteriormente, foi realizado uma nova simulação utilizando o *software* OptiSystem®, também desenvolvido pela OptiWave®. O *software* Optisystem® consiste em um programa de simulações desenvolvido para sistema ópticos de telecomunicações e comunicações ópticas. No programa é possível simular sistemas ópticos com vários componentes, desde lasers, fibras ópticas, medidores de potência, analisadores de espectro óptico, circuladores ópticos, LEDs, entre diversos outros componentes. É importante ressaltar que a nova versão do *software* dispõe de componentes baseados em FBGs, que podem ser incluídos em projetos para realizar simulações das configurações propostas.

Na Figura 12 é apresentado a área de trabalho do *software* OptiSystem®. Na imagem observa-se a presença de uma fonte de luz contínua, um circulador óptico, duas grades de Bragg, centradas em 1550 nm, e um medidor de potência, também denominado *power meter*. Além disso, nota-se a presença de outros dispositivos ópticos adicionados ao sistema. Entretanto, esses dispositivos foram adicionados apenas à título de análise. É importante ressaltar que, a característica de largura de banda de reflexão da grade, eram alteradas para realizar a comparação com as configurações propostas. Outra observação importante é que no *software* em questão não é possível configurar a grade de Bragg em fibra óptica como um módulo sensor de temperatura, que varie o comprimento de onda de reflexão de acordo com a temperatura, como demonstrado no software OptiGrating®, na seção 4.1.1. Em decorrência disso e como o princípio de funcionamento da grade de Bragg baseia-se no deslocamento do comprimento de onda de reflexão de Bragg (λ_B), optou por criar um deslocamento manual do comprimento de onda de reflexão de 1550.0 até 1551.0,

com passo de 0,1 nm, ou seja, o objetivo era apenas de simular uma variação de temperatura e, conseqüentemente, uma alteração do comprimento de onda de reflexão. Entretanto, como o objetivo da simulação era apenas compreender e comparar as variações de potência que esse deslocamento causava nas quatro configurações propostas, considerou-se o resultado relevante para o projeto.

Figura 12 – Simulação OptiSystem na configuração proposta do sensor



Fonte: Autor

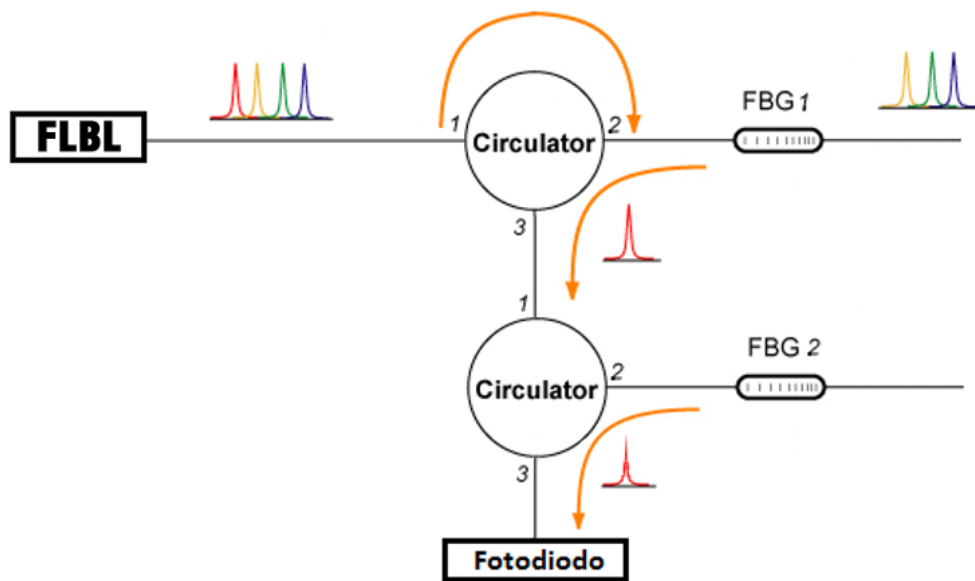
É importante ressaltar que no OptiSystem® só era possível modificar as características da largura de banda de reflexão da grade de Bragg, ou seja o FWHM do pulso refletido, e o comprimento de onda de reflexão (λ_B), no caso em questão, ambos centrados em 1550 nm, à 25 °C, e variando de 1550.0 até 1551.0, com passo de 0,1 nm, com o aquecimento simulado da conexão. Outras características da FBG, tais como: número de segmentos, comprimento da grade, tipo de grade e os coeficientes de expansão térmico e coeficiente termo-óptico não eram possível modificar, então não foram modificados. Todavia, como o objetivo desta simulação era exatamente comparar as quatro configurações propostas, que diferenciam-se apenas pela largura de banda de reflexão da grade, não seria necessário modificar outras características na simulação, haja vista que as grades apresentadas diferenciam-se apenas pela largura de banda de reflexão, mantendo todas as outras características iguais.

As simulações mencionadas nesta seção possuem o objetivo de comparar e validar as configurações propostas e, posteriormente, auxiliar na construção do protótipo proposto

neste trabalho. Os resultados das simulações serão comentados no próximo capítulo.

Entretanto, a partir de uma nova revisão da literatura, observou-se a possibilidade de utilizar uma outra configuração de interrogação para o sensor FBG de temperatura. Essa configuração consistia em utilizar dois circuladores ópticos e duas grades de Bragg em fibra óptica com o mesmo comprimento de onda central. Nessa situação, a primeira grade agiria como elemento sensor, alterando seu comprimento de onda de Bragg (λ_B) de acordo com a temperatura da conexão, e a segunda grade agiria como elemento analisador, refletindo parte do espectro recebido para o fotodiodo. (ZHAN; XUE; YANG, 2007)

Figura 13 – Configuração com dois circuladores



Fonte: Thorlabs.com - Adaptada

Como mencionado, na Figura 13 é apresentado um outro cenário de configuração do sensor óptico de temperatura. Na imagem é possível observar a presença de uma fonte de luz de banda larga (FLBL), dois circuladores, duas grades de Bragg e um fotodiodo.

Todas as configurações mencionadas nesta seção, cenários 01 e cenário 02, serão abordadas no próximo capítulo, junto com os resultados obtidos.

3.2 Sistema de Medição

O objetivo do sistema de medição é criar uma interface de comunicação entre o transdutor óptico e um sistema embarcado. Como mencionado anteriormente, o sensor óptico de temperatura é totalmente capaz de sentir a variação de temperatura e, exatamente, para isso está sendo desenvolvido. Todavia, é incapaz de fornecer os valores de temperatura de forma clara, necessitando de um sistema que realize a conversão para valores de

temperatura reais. De forma mais didática, o transdutor óptico responde à variação de temperatura com uma saída em tensão elétrica, obtida pelo fotodetector. Todavia, para realizar a conversão para graus Celsius é necessário realizar o processamento do sinal captado.

Para isso, integrado ao transdutor óptico mencionado, foi proposto um sistema de medição que realize a captura, o tratamento e o processamento do sinal, fornecendo em sua saída a temperatura instantânea do ponto quente mensurado.

Inicialmente, para realizar a conversão do sinal óptico para sinal elétrico, utilizou-se o fotodiodo SM05PD6A, da Thorlabs, que atua na região de comprimento de onda do infravermelho, em 1550 nm. Considerando que o sinal de interesse possui um perfil de onda contínua, foi utilizado um filtro passa-baixa, com corte em 100 Hz, para atenuar os efeitos de ruídos de frequências indesejáveis. Para finalizar a etapa de tratamento do sinal elétrico, com o objetivo de aumentar a sensibilidade do sistema, o sinal foi amplificado utilizando um amplificador operacional OPA4344, com um fator de amplificação de 11 vezes.

Em seguida, com o auxílio de um microcontrolador ATMega328, é realizado uma conversão analógica-digital do sinal elétrico tratado. Este microcontrolador contém cinco portas analógicas/digitais com precisão de 10 bits. Após isso, com posse da resposta do conversor A/D, o sistema embarcado usando um módulo GPRS, realiza o envio da medida capturada para uma plataforma de recepção de dados. É importante ressaltar que, para evitar um alto gasto de processamento do microcontrolador e, também, um gasto desnecessário da bateria do sistema de medição, o servidor *web* que irá realizar a tarefa de aplicar o resultado recebido em uma equação de calibração para determinar a temperatura instantânea, em °C, do ponto mensurado.

Considerando que, em geral, as anomalias geradas por pontos quentes possuem uma evolução gradativa, as medidas de temperatura são realizadas em intervalos periódicos. Consequentemente, os envios para o servidor também ocorrerão de forma periódica. Essa característica do sensor proporciona uma economia de bateria e um maior período de operação do protótipo.

Após o processamento do sinal elétrico capturado, é importante que o sensor não apenas reaja a variação de temperatura, mas, também, seja coerente os valores aferidos por ele. Para isso, antes de protótipo entrar em operação é necessário realizar medidas de calibração e validação do sensor proposto, tornando-o mais confiável para medidas de temperatura na concessionária.

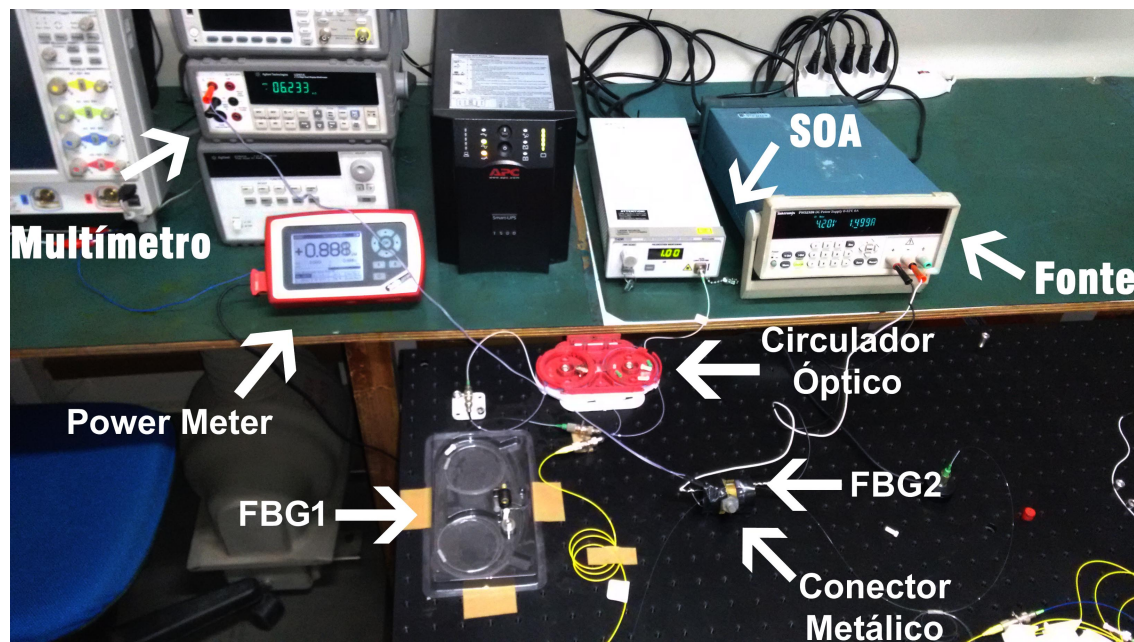
3.2.1 Calibração e Medições de Temperatura

Uma vez que o transdutor óptico entrega apenas a variação da potência óptica influenciada pela a variação de temperatura, se faz necessário o processamento do sinal

a fim de obter os valores de temperaturas reais. Todavia, para realizar essa operação, é necessário criar um padrão no qual o sistema irá receber os dados cru do transdutor óptico e aplicar em uma função matemática para determinar a temperatura instantânea do ponto específico. O processo de criação da função matemática é denominado calibração do sensor. Para isso, é necessário criar um ambiente de medição de temperatura, onde atue o transdutor óptico proposto em conjunto com um sensor de temperatura já validado no mercado.

O ambiente de medição de temperatura é composto por uma conexão elétrica, um resistor de potência, um termistor e o transdutor óptico de temperatura proposto. A resistência elétrica possui a função de aumentar a temperatura da conexão, simulando um ponto quente em laboratório. As medidas são realizadas de forma simultânea, capturando os valores de temperatura reais obtidos pelo termistor e, também, os valores de potência óptica obtidos pelo transdutor óptico. Essa metodologia proporciona ao ambiente criar uma análise comparativa e controlada entre os valores obtidos pelo termistor e os valores de potência obtidos pelo transdutor óptico em desenvolvimento. Após isso, cria-se uma função matemática de calibração, onde os valores de potência capturados em determinados instantes, são relacionados com as temperaturas obtidas no mesmo instante.

Figura 14 – Metodologia do experimento em laboratório



Fonte: Autor

Na Figura 14 é apresentado o ambiente de medição utilizado para realizar a validação e calibração do transdutor óptico de temperatura. Além disso, são especificados todos os componentes utilizados nos experimentos realizados em laboratório. O experimento possui um circulador óptico, uma fonte de luz de banda larga, duas grades de Bragg (FBG) e um conector metálico, simulando uma conexão existente em campo. Além disso, o experimento

foi realizado com o auxílio de uma fonte de tensão para aquecer as resistências inseridas dentro da conexão elétrica e um multímetro que capturava os valores da resistência do termistor, com posse dessa informação era possível aferir a temperatura da conexão em determinado instante. O medidor de potência informa a potência óptica recebida pelo fotodiodo. No centro da imagem, observa-se a presença da conexão elétrica, envolvida com adesivo para fixar o termistor e a grade de Bragg (FBG2) e mantê-los sempre em contato com a superfície quente da conexão. O objetivo de utilizar o termistor em conjunto com a grade de Bragg é criar uma função matemática de calibração e, posteriormente, operar o transdutor óptico de forma independente, sem mais a necessidade da presença do termistor.

3.3 Plataforma de Monitoramento

O projeto proposto neste trabalho, Sistema Remoto de Monitoramento de Pontos Quentes em Conexões Elétricas Utilizando Sensores Ópticos, possui como um dos seus objetivos desenvolver uma plataforma *web* capaz de receber os dados emitidos por cada nó sensor de temperatura presentes nas conexões elétricas da concessionária. As informações dos nós sensores serão apresentadas, em forma de gráfico e texto, para o técnico responsável da concessionária. E, paralelamente, serão monitoradas pelo próprio sistema, criando alertas visíveis ao técnico, quando ocorrer o surgimento de alguma anomalia suspeita na rede.

O desenvolvimento da plataforma de monitoramento foi dividida nas seguintes etapas: modelagem dos requisitos e codificação do *software*. Inicialmente, foram analisadas características relevantes do funcionamento do sistema de monitoramento para auxiliar o técnico responsável na prevenção de falhas. O programa proposto deve conter as seguintes características: alertar da necessidade de uma manutenção preditiva, mapear a temperatura numericamente e em escala de cores, mapear conexões por região, armazenar em banco de dados o histórico de manutenção de pontos específicos da subestação, gerar gráficos de evolução de uma determinada conexão e comunicar-se com o sistema embarcado.

Após determinar as principais característica do sistema de monitoramento, ou seja, a modelagem do sistema. O próximo passo consiste em iniciar codificação do *software*. A etapa de desenvolvimento foi dividida em duas etapas sendo a primeira denominada *front-end*, alinhada com o *layout* da página, e a segunda denominada *back-end*, que realizava a recepção dos dados e o armazenamento em um banco de dados.

O *front-end* consiste em uma parte do *software* que interage diretamente com o usuário e possui uma interface gráfica amigável, trabalhando na frente da aplicação, ou seja, a página *web* do sistema. No sistema proposto, a página *web* será responsável por realizar o registro de novos usuários, inclusão de sensores de pontos quentes, apresentação dos dados aos técnicos da concessionária, através de gráficos e tabelas, visualização da

localização de cada nó sensor na rede elétrica entre outras funcionalidades.

Já a etapa de *back-end* consiste em uma parte do projeto que está por trás da aplicação, ou seja, em segundo plano, invisível ao usuário. No projeto em questão, o *back-end* é responsável pela recepção dos dados enviados pelo nó sensor, organização dos dados em um banco de dados e adequação e comunicação com o aplicação do sistema, ou seja, com o *front-end* da plataforma.

A integração dos sistemas *back-end* e *front-end* será de vital importância para o êxito do projeto. Haja vista que, o servidor irá receber as informações geradas pelos nós sensores e irá criar uma análise quantitativa da temperatura presente na conexão, caso a conexão esteja com um valor de temperatura acima do permitido pela folha de especificação do fabricante da conexão, o sistema irá alertar o técnico da concessionária para realizar uma manutenção em campo no local da ocorrência. Além disso, o técnico operador do sistema proposto poderá através da comparação da temperatura dos sensores, realizar uma análise qualitativa dos nós sensores presentes na rede. Em geral, essas análises são interessantes para comparar em um mesmo equipamento nós com temperaturas diferentes, gerando desconfiança por parte da equipe de manutenção.

Dessa forma, a plataforma de monitoramento irá auxiliar na percepção do surgimento de pontos quentes na rede e também a ajudar na manutenção do sistema, realizando operações preditivas no rede elétrica da concessionária.

4 Resultados

De acordo com a metodologia adotada na seção anterior, foram obtidas diversas informações que auxiliaram na construção do sistema remoto de monitoramento de pontos quentes em conexões elétricas.

De início, as simulações utilizando o *software* OptiGrating[®] ajudaram a compreender o funcionamento das grades de Bragg em fibra óptica, assim como a sensibilidade do transdutor óptico proposto às variações de temperatura do sistema.

Posteriormente, com o objetivo de determinar qual configuração proposta melhor atuaria como sensor óptico de temperatura, foram utilizadas as simulações no *software* Matlab[®] e no *software* OptiSystem[®]. As simulações citadas foram de fundamental importância para realizar a comparação das quatro configurações propostas abordadas no seção 3 deste trabalho. Com posse dessas informações, foi possível direcionar a construção do sensor óptico, reduzindo o tempo de desenvolvimento e melhorando a sensibilidade do sensor de temperatura. Todas as simulações realizadas no decorrer deste trabalho, serão apresentados neste capítulo.

Todavia, a partir de uma nova revisão da literatura, observou-se um segundo cenário para a configuração deste sensor óptico de temperatura, ou seja, um novo modo de interrogação. Ambos os cenários, cenário 01 e cenário 02, serão analisados e comparados nesta seção do trabalho para definir a configuração que melhor se adapta ao objetivo do projeto proposto.

Em seguida, serão apresentados os resultados obtidos na construção do sensor óptico de temperatura, assim como o sistema de medição com sua respectiva placa eletrônica e, também, o sistema remoto de monitoramento, com ênfase na página web, denominada *front-end*, e o servidor de recepção dos dados, denominado *back-end*.

4.1 Sensor Óptico de Temperatura

4.1.1 Simulações no OptiGrating[®]

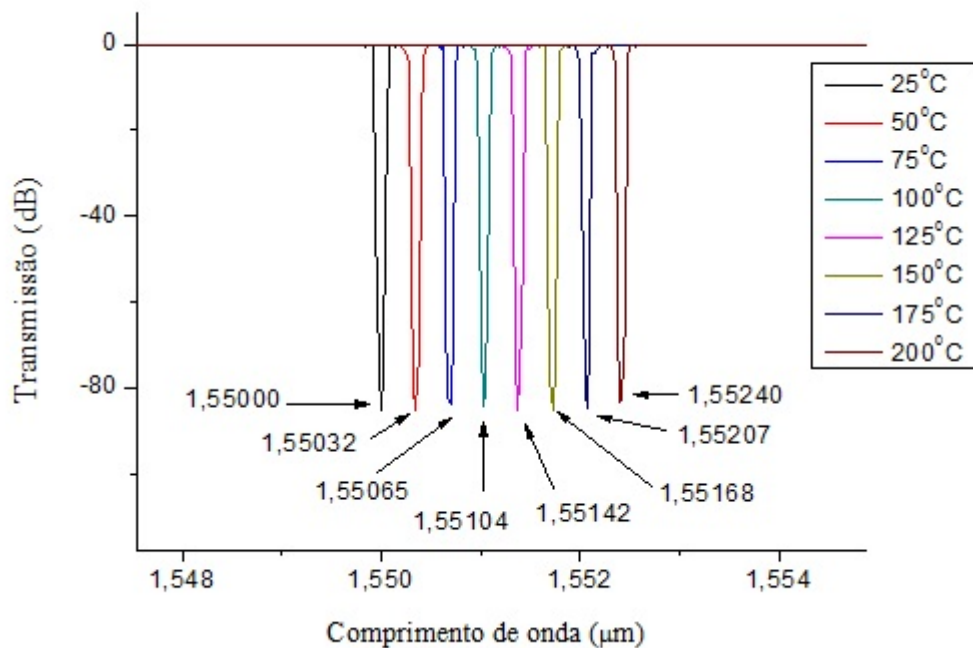
Na seção anterior foi abordada a metodologia utilizada para a construção do ambiente de simulação do OptiGrating[®].

Na Figura 15 é apresentado o resultado de uma simulação utilizando o programa OptiGrating[®]. Na imagem é apresentado o gráfico de transmitância de um pulso óptico sobre uma FBG. Primeiramente, é possível perceber que o sistema é iluminado por uma fonte de luz de banda larga, onde apenas o comprimento de onda de Bragg está sendo

refletido. Na imagem são apresentados oito deslocamentos do comprimento de onda de Bragg (λ_B) em temperaturas diferentes. Observa-se que, de acordo com o aumento de temperatura, há um deslocamento crescente do comprimento de onda de Bragg (λ_B) de reflexão. Esse deslocamento é justificado com o apresentado na Equação (2.1), que afirma que o aumento do período da grade (Λ) é diretamente proporcional ao comprimento de onda de Bragg, ou seja, com a expansão térmica da grade, há uma variação positiva do período da grade e, conseqüentemente, um aumento do comprimento de Bragg de reflexão. No exemplo apresentado, o comprimento de onda de Bragg para 25°C é de 1550 nm, enquanto para uma temperatura de 200°C o comprimento de reflexão é 1552,40 nm.

No gráfico apresentado, é possível observar o deslocamento do comprimento de onda de Bragg em relação a temperatura. Esse comportamento da grade de Bragg em fibra óptica era previsto através das equações analíticas deduzidas na segunda seção deste trabalho. Outro ponto importante, é que no gráfico apresentado é possível notar que, independente do valor de temperatura, a largura de banda do pulso refletido é igual em todos os casos.

Figura 15 – Simulações de Temperatura com FBG



Fonte: Autor

As simulações realizadas forneceu a compreensão da sensibilidade da FBG à variação de temperatura. Observou-se que, para uma variação de temperatura (ΔT) de 175°C, houve um deslocamento do comprimento de onda de Bragg de 2,40 pm. Em outras palavras, a sensibilidade da grade pode ser mensurada pelo deslocamento do comprimento de onda de reflexão (λ_B) de 0,013 pm/°C. Essa sensibilidade pode ser considerada para valores do

coeficiente de expansão termo-óptico e o coeficiente de térmico iguais aos especificados na seção 2.2.3.

4.1.2 Configuração do Sensor Óptico de Temperatura

Diante das propostas 01 a 04, referentes à configuração do sensor óptico de temperatura, foram utilizados *softwares* de simulação para auxiliar na configuração que resultasse na melhor resposta do sensor. Inicialmente, foram realizadas simulações utilizando o programa Matlab[®] e, em seguida, o *software* OptiSystem[®]. Os resultados de ambos métodos serão apresentados nesta seção.

Na Figura 16 é apresentado o resultado obtido através da simulação realizada no Matlab[®]. No gráfico apresentado a curva referente a configuração com duas grades simétricas de 1,2 nm de largura de banda possui um coeficiente angular superior as demais, consequentemente, essa configuração garante uma maior sensibilidade para o sensor. Logo, percebe-se que a configuração simétrica com duas grades de Bragg com largura de banda de 1,2 nm, obteve o resultado mais satisfatório. Principalmente, quando comparada às outras configurações.

Com o objetivo de ratificar e validar os resultados encontrados na simulação do Matlab[®], foi utilizado o *software* OptiSystem[®] para comparar as propostas de interrogação do sensor óptico de temperatura. Para isso, novamente, foram utilizadas todas as quatro configurações propostas inicialmente.

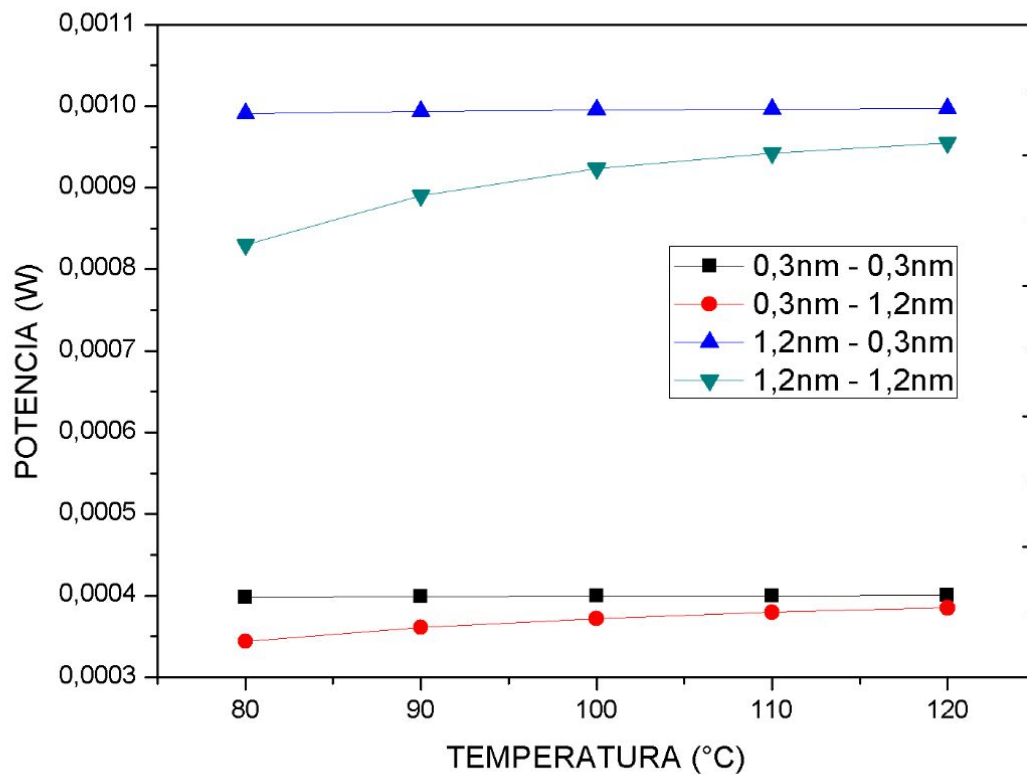
A Figura 17 demonstra o resultado das simulações para as todas as configurações. Novamente, observa-se que a configuração simétrica que utiliza duas grades de Bragg com largura de banda de 1,2 nm, obteve a melhor resposta quando comparadas às outras configurações.

Diante desses resultados, optou-se por utilizar no sensor óptico de temperatura a configuração simétrica com duas grades de Bragg com largura de banda de reflexão de 1,2 nm. Haja vista que, um dos principais parâmetros para o desenvolvimento de um sensor consiste na sua sensibilidade à uma ação de entrada. Considerando os resultados de simulações obtidos, neste tópico foram determinadas as configurações de interrogação e as melhores características das grades para o sensor óptico de temperatura.

As simulações mencionadas nesta seção possuem o objetivo de comparar as configurações de interrogações propostas. Os resultados obtidos em ambas as simulações demonstraram que a configuração simétrica com largura de banda de 1,2 nm, ou seja proposta 02, apresentaram uma maior curva de variação, consequentemente, até o momento elegeu-se a mais apta para a construção do protótipo proposto neste trabalho.

Todavia, o sensor óptico atua apenas como um transdutor de temperatura. Em outras palavras, é possível afirmar que o sensor proposto consegue sentir a variação

Figura 16 – Gráfico de Resposta de Várias Configurações das FBGs (Matlab®)



Fonte: Autor

da temperatura, porém, sozinho, não consegue mensurar, ou aferir, os valores reais de temperatura. Para esse funcionamento, o transdutor óptico necessita integrar em sua composição um sistema embarcado de medição, capaz de transformar os valores obtidos pelo transdutor em valores reais de temperatura.

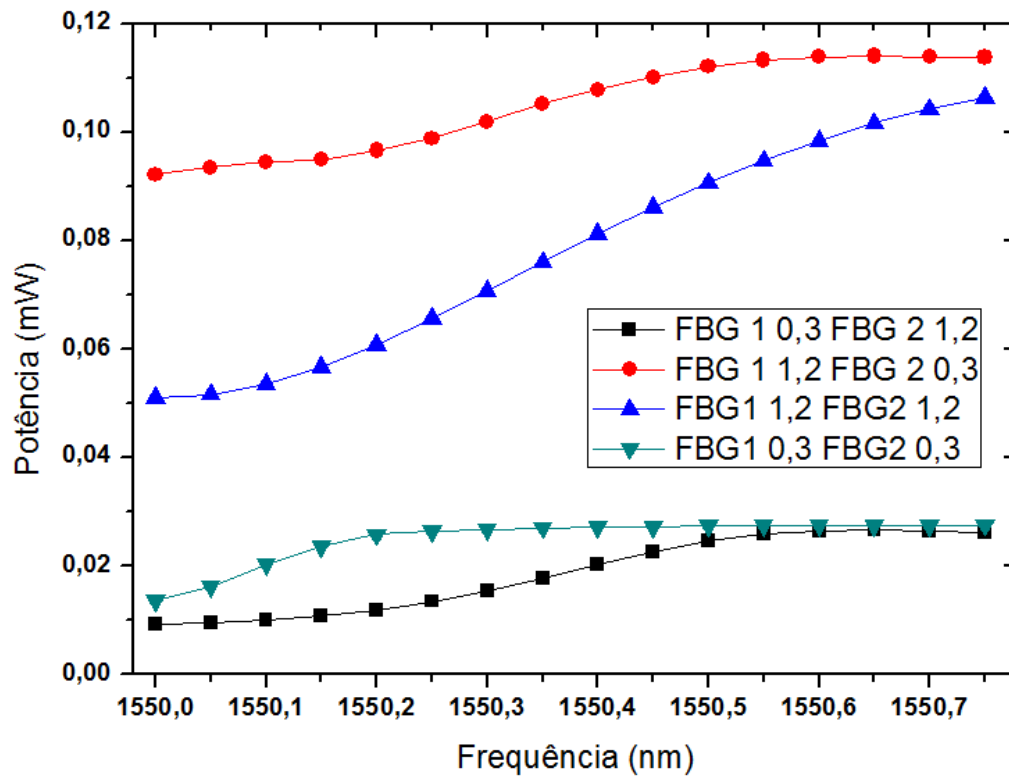
4.1.3 Experiências em Laboratório

Devido as dificuldades encontradas na operação da configuração determinada na etapa anterior, nessa momento as experiências em laboratório foram divididas em dois cenários, o primeiro cenário com apenas um circulador óptico e, um segundo cenário utilizando dois circuladores ópticos para a configuração do sensor, mencionado no capítulo três deste trabalho.

Entretanto, apenas do primeiro cenário foram realizadas simulações numéricas da configuração proposta. Esses resultados foram importante para compreender a resposta do sensor e prever sua resposta em experiências práticas.

Em ambos os cenários foi utilizado um termistor para aferir as temperaturas da

Figura 17 – Gráfico de Resposta de Várias Configurações das FBGs (OptiSystem®)



Fonte: Autor

conexão. O termistor NTC consiste em uma resistência variável inversamente proporcional à temperatura ao qual está submetida. Em outras palavras, a resistência do termistor diminui quando submetido a um aumento da temperatura da conexão. Nos experimentos foi utilizado um termistor de 10k Ohms, que possui características de ter alta sensibilidade a variação de temperatura e, segundo a sua folha de especificações, consegue medir temperaturas na faixa de -55 °C à 125 °C.

Além disso, um amplificador óptico de semiconductor (SOA) foi utilizado como uma fonte de luz de banda larga para o sensor óptico de temperatura. Haja vista que, com o aumento da temperatura, há o deslocamento do comprimento de onda de Bragg (λ_B). Consequentemente, é necessário que haja uma ampla faixa do espectro para que seja possível haver o deslocamento do pulso refletido.

Considerando o exposto e diante dos resultados mencionados em simulação, foram realizadas medidas em laboratório do primeiro cenário para ratificar os dados obtidos. De acordo com os resultados encontrados nas simulações e visando obter a melhor resposta para o sensor óptico proposto, foi utilizada a configuração com FBGs gêmeas, com largura de banda de 1,2 nm.

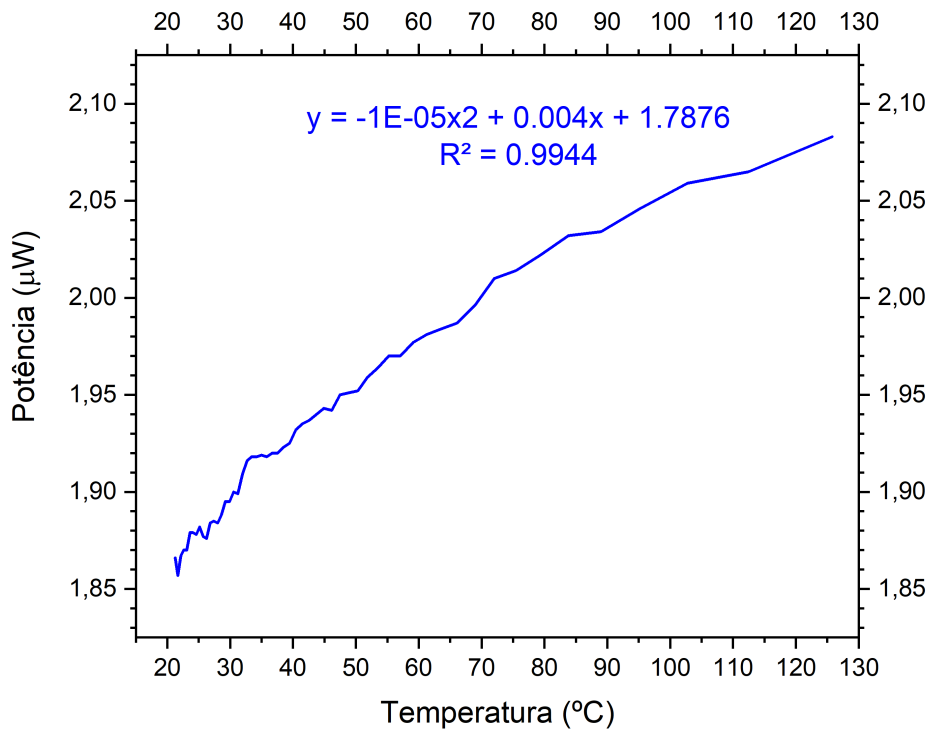
As medidas eram realizadas coletando os valores de temperatura fornecidos pelo termistor e o valor de potência óptica obtido pelo fotodiodo. Inicialmente, o objetivo era

mapear o comportamento dessa configuração e analisar os resultados obtidos juntos às simulações apresentadas.

Os experimentos eram realizados em um ambiente controlado, onde as conexões elétricas possuíam resistores de potência acoplados para criar um ambiente onde houvesse uma conexão sobreaquecida. Então, após a preparação do laboratório, os resistores eram energizados para iniciar o aquecimento da conexão. A partir deste momento, os pontos eram coletados e armazenados em uma planilha. Como mencionado, a temperatura máxima de operação do termistor era de 125 °C. Então, as medidas foram realizadas apenas até essa temperatura.

Na Figura 18 é apresentado o gráfico obtido em uma das medidas coletadas. Na imagem é possível observar um comportamento da curva de resposta do sensor de temperatura proposto, semelhante ao encontrada nas simulações, principalmente a do MatLab®. Além disso, é apresentado o coeficiente de determinação (R^2) da curva e, também, a função polinomial de segunda ordem que é mais se assemelha a curva do sensor.

Figura 18 – Cenário 01 - FBGs gêmeas 1,2 nm



Fonte: Autor

Observe que, o comportamento da curva do sensor óptico proposto é crescente, uma vez que o sistema possui apenas um circulador óptico, configuração apresentada na Figura 11. Essa característica determina que a grade de Bragg FBG1 se conecta à porta 2 do circulador, enquanto a grade de Bragg FBG2, elemento sensor, conecta-se

à porta 3 do mesmo circulador. Uma vez que ambas as grades estão dispostas sobre a mesma temperatura o pulso refletido pela grade FBG1 também será refletido pela a grade FBG2 encaminhando o pulso para porta 3 do circulador, que será atenuado. Dessa forma, dispostas à temperaturas iguais, o fotodiodo não receberá nenhuma, ou pouco, potência óptica. Então, a partir do variação da temperatura e, conseqüentemente, variação do espaçamento entre as grades, haverá um deslocamento do comprimento de onda de Bragg (λ_B) e uma defasagem dos sinais refletidos pelas grades.

É interessante salientar que, embora os sensores baseados em FBG possuam alta sensibilidade, a variação de potência óptica foi de 217 nW, ou seja, com o deslocamento do comprimento de onda de Bragg, conseqüentemente, houve uma leve variação de potência.

Outro detalhe interessante, é que embora as potências utilizadas nas simulações sejam divergentes da potência utilizada em laboratório, o comportamento em ambas as curvas são crescentes e possuem características semelhantes, apresentando resultados compatíveis. Principalmente, quando comparada à simulação com grades gêmeas de 1,2 nm realizada no *software* Matlab®.

Em relação ao esquema proposto, a grade de Bragg FBG2 atuava como elemento sensor. Todavia, para obter êxito nessa configuração foi necessário realizar a conectorização na outra extremidade da fibra com a grade FBG2 para conectar ao fotodiodo. Essa conectorização prejudicava o sensor, pois a fibra óptica teria que retornar a placa de medição, haja vista que LED e fotodiodo estariam conectados a mesma placa eletrônica, dificultando a instalação do sensor e criando risco na sua operação, haja vista que as fibra retornando estaria mais susceptíveis a ruptura.

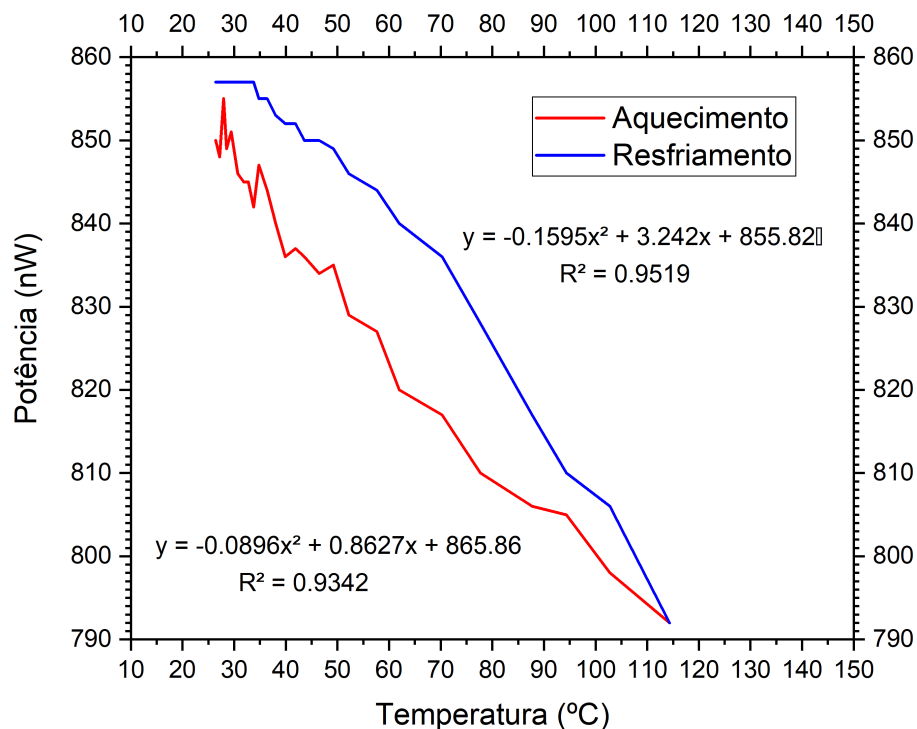
Diante disso, foi encontrado na literatura outro esquema de interrogação de sensores baseados em grades de Bragg. Ness configuração, há dois circuladores, duas grades de Bragg, uma fonte de luz de banda larga e um fotodiodo. Esse esquema apresentado na seção anterior, Figura 13 deste trabalho. Nesse caso, a grade de Bragg FBG1 atuaria como elemento sensor conectada à conexão elétrica em análise (ZHAN; XUE; YANG, 2007).

Após a determinação de um outro esquema de configuração das grades de Bragg, foram iniciadas novas medidas para comparar os esquemas discutidos nessa seção e determinar qual configuração possui a melhor resposta para o sensor óptico de temperatura proposto. Para isso, foi utilizada a mesma metodologia adotada nos experimentos anteriores. Todavia, visando um alcançar um bom funcionamento do sensor quando aplicado às conexões elétricas monitoradas na Companhia de Eletricidade do Amapá (CEA) foram realizadas medidas de aquecimento e resfriamento da FBG. Essa metodologia é importante por que as redes elétricas possuem variações da potência distribuída, oscilando o valor da corrente elétrica em períodos diurnos e noturnos.

Na Figura 19 é apresentado o gráfico obtido por meio dos experimentos em labora-

torios da segunda configuração, seus respectivos coeficientes de determinação e as funções polinomiais correlacionadas com a curva obtida. Como mencionado, nessa configuração foi realizada medidas de aquecimento e resfriamento da grade de Bragg. E, considerando o exposto, é possível perceber uma diferença significativa entre as curvas de aquecimento e resfriamento. Observa-se a presença de um efeito de memória da grade aquecida, de tal forma, que a mesma não possui uma resposta rápida a variação de temperatura. Esse comportamento prejudica o funcionamento do sensor óptico proposto, haja vista que haverá dois pontos de potência óptica para uma mesma temperatura. É importante salientar que, embora esse fenômeno tenha ocorrido apenas na configuração 02, é possível prever que esse comportamento estaria presente em ambas as configurações propostas para interrogação do sensor. Nos experimentos realizados em laboratório foram utilizadas grades de Bragg sem revestimento, ou seja, a FBG diretamente em contato com a conexão. Todavia, existem técnicas de revestimento com poliamida, aço inoxidável ou teflon, que melhoraram a velocidade de resposta da grade de Bragg.

Figura 19 – Gráfico de resposta da configuração 02 com Dois circuladores, medidas de aquecimento e resfriamento



Fonte: Autor

Em relação a variação de potência, observa-se que a variação obtida nessa configuração é de apenas 0,07, ou seja, aproximadamente três vezes menor do que na configuração anterior. Outro ponto importante é que, em ambas as situações analisadas, seja na con-

figuração 01 ou configuração 02, o comportamento de todas as curvas foram de funções polinomiais de segundo grau. Entretanto, como era previsto, no caso da configuração 02, há um comportamento decrescente quando submetida à aquecimento da conexão. Esse comportamento era esperado, uma vez que, quando as fibras estivessem com a mesma temperatura, o pulso refletido na FBG1 e encaminhado para FBG2 integralmente refletido para o fotodiodo, haja vista que são grades gêmeas com o mesmo comprimento de reflexão de Bragg (λ_B). Dessa forma, a situação que ocorre potência máxima do sinal luminoso é quando ambas as grades estão dispostas a mesma temperatura.

Embora com a desvantagem de uma variação de potência óptica inferior ao obtida na configuração 01, optou por utilizar a segunda configuração para desenvolvimento do sensor óptico de temperatura. Uma vez que, a segunda configuração possui maior simplicidade na operação e possui menos riscos de rupturas e danos, haja vista que não há necessidade de realizar a conectorização da FBG sensora e, também, não será necessário retornar a fibra para o sistema de medição na placa eletrônica.

4.1.4 Sistema de Medição

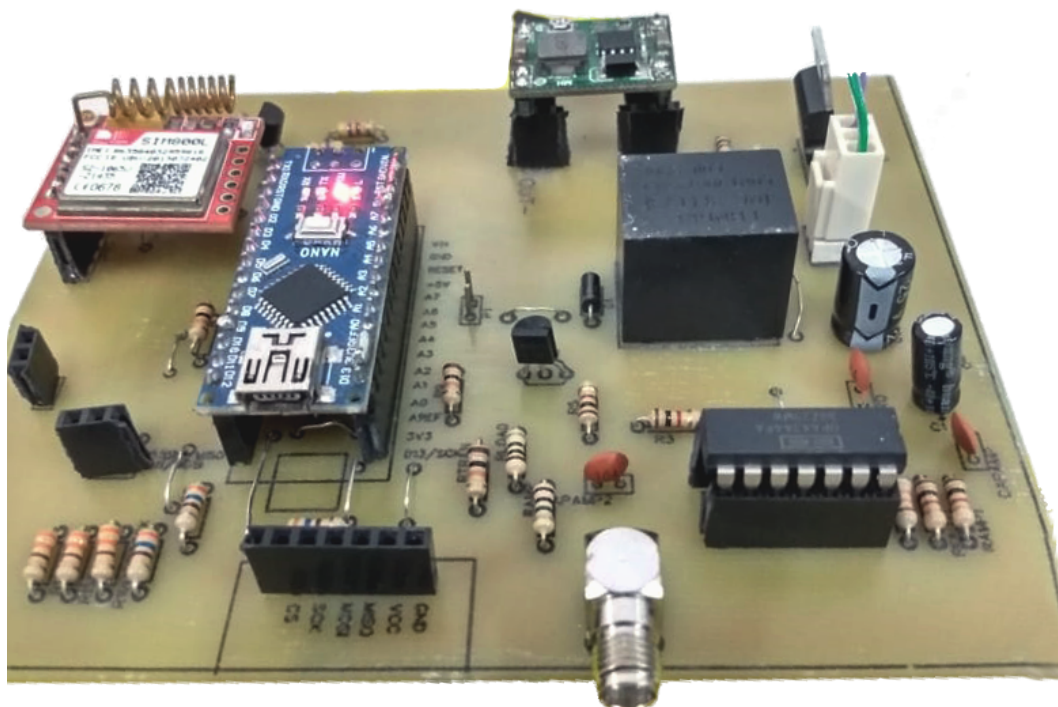
O sistema de medição possui a função de realizar as leituras do sensor óptico e convertê-las em valores de temperatura. Após isso, o sistema irá enviar os dados para o servidor Web, por meio de um módulo GPRS conectado à Internet. Em seguida, a placa de aquisição de dados grava os dados de leitura obtidos em um cartão de memória. Essa última funcionalidade possui o objetivo de manter os dados em memória local, para caso ocorra algum erro na transmissão dos pacotes para o servidor ser possível reenviar os dados corrompidos na transmissão ou, até mesmo, acessar os dados em um computador utilizando o próprio cartão de memória.

Para isso executar essas funções, foi confeccionada uma placa eletrônica com um microcontrolador ATMEGA328, que dispõe de um conversor A/D, de 10 bits, um módulo GPRS e um cartão de memória para realizar as gravações dos dados obtidos.

Na Figura 20 é apresentada a placa eletrônica do sistema remoto de monitoramento de pontos quentes em conexões elétricas. Além dos dispositivos citados acima, a placa possui um suporte para uma fonte de luz de banda larga para a faixa de 1550 nm, um conector para o fotodiodo SM05PD6A, com responsividade na faixa de 1550 nm e um termistor para validar as temperaturas aferidas pelo sensor óptico de temperatura. Entretanto, quando em operação em campo, o termistor não será utilizado.

O circuito do fotodiodo é composto de um filtro passa-baixa de primeira ordem em 100 Hz, uma fonte de alimentação de 3V e um resistor de carga. O objetivo da filtragem é reduzir ruídos brancos inerentes de qualquer sistema eletrônico, haja vista que obtido não possui frequência de oscilação. Então, posteriormente, o sinal elétrico é amplificado

Figura 20 – Placa eletrônica de medição



Fonte: Autor

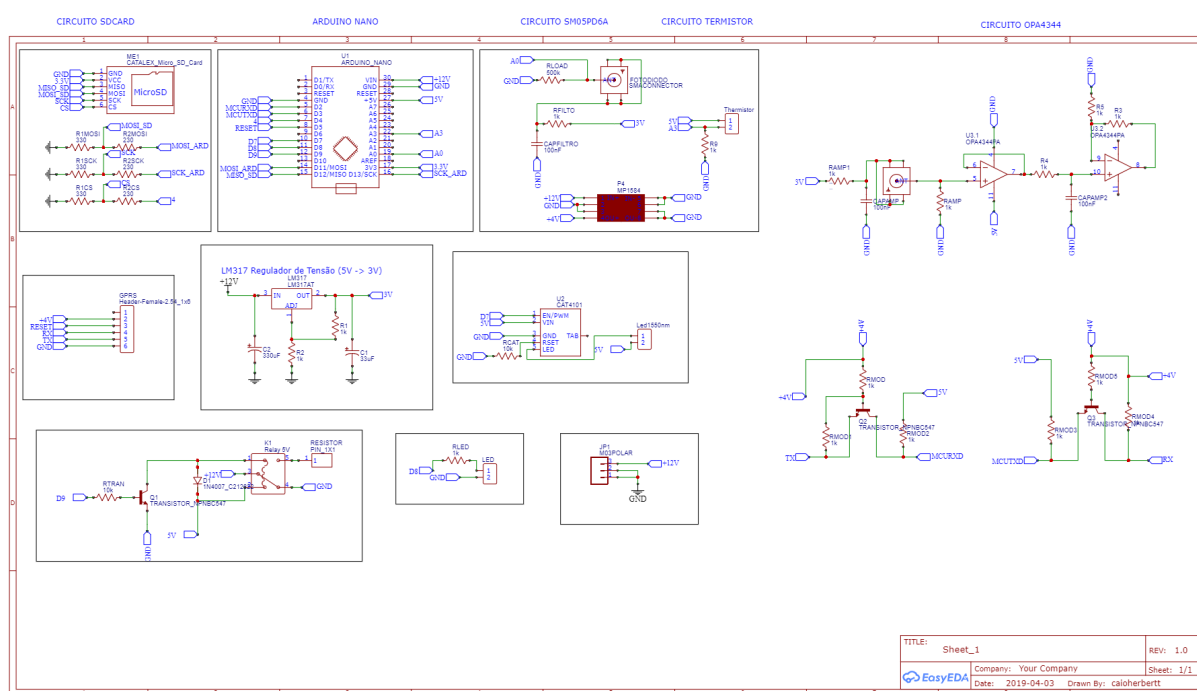
por um amplificador operacional e submetido ao conversor A/D do microcontrolador com uma precisão de 10 bits. Assim como apresentado nas simulações e nos experimentos em laboratório, a intensidade do sinal elétrico convertido no fotodiodo é diretamente proporcional a temperatura encontrada na conexão elétrica.

Na Figura 21 é apresentado o esquemático da placa eletrônica confeccionada para o projeto proposto. No esquemático é possível identificar o circuito eletrônico utilizado para tratar o sinal elétrico recebido pelo fotodiodo. Além disso, é possível ter conhecimento de outros componentes utilizados no sistema de medição.

Na Figura 22 é apresentado um diagrama de blocos do funcionamento do sistema de medição apresentado neste tópico. Como apresentado, inicialmente, o sistema irá receber a leitura obtida no fotodiodo, em seguida o sistema utiliza um filtro passa-baixa para evitar ruídos que interfiram na sensibilidade do sensor proposto. Após isso, o sinal elétrico é amplificado e com a ajuda de um conversor analógico/digital é processado pelo microcontrolador. Este último, conectado a Internet, envia as informações obtidas e tratadas do sensor para um servidor Web alocada na Internet.

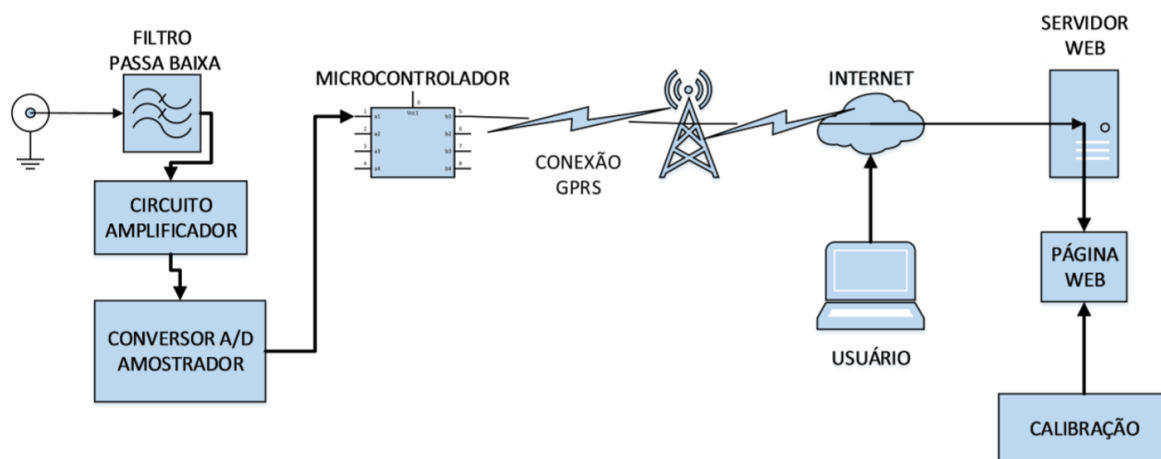
É importante salientar que, os dados que chegam ao servidor contém apenas a tensão obtida no conversor A/D. Embora seja um dado importante para o sistema de

Figura 21 – Esquemático sistema de medição



Fonte: Autor

Figura 22 – Diagrama de blocos do sistema de medição



Fonte: Autor

monitoramento, dessa maneira não possuem nenhuma informação de temperatura contida na mensagem. Entretanto, para obter os dados da temperatura da mensagem enviada é necessário submetê-los a equação de calibração que é processada no servidor. Após submeter a equação, o resultado é um valor de temperatura em graus Celsius. Esses valores são armazenados em um banco de dados e, são utilizados para realizar alertas sobre a saúde dos equipamentos da rede elétrica da concessionária.

4.1.5 Calibração e Medições de Temperatura

Como mencionado na seção anterior, para converter os dados recebidos do sistema de medição se faz necessário submetê-los a equação de calibração previamente definidas no servidor Web. Então, as equações de calibração consistem em uma função bijetora que relacionam os valores de tensão enviados pela placa eletrônica, com suas respectivas representações de temperatura em graus Celsius.

Essas equações de calibração são confeccionadas através de medidas em laboratórios que relacionam o valor de temperatura aferidos por um sensor validado no mercado com os valores de tensão recebidos pelo sistema de medição proposto, criando curvas de correlação. Para obter resultados confiáveis das equações obtidas são realizadas diversas medidas com a mesma configuração. Então, são determinados valores médios, desvio padrão, entre outras características para determinar uma curva que seja eficiente mesmo em ambientes adversos.

4.2 Plataforma de Monitoramento

Como mencionado na Seção 3.3, o desenvolvimento da plataforma de monitoramento foi dividida nas seguintes etapas: modelagem dos requisitos e codificação do *software*. Além disso, a plataforma de monitoramento era composta por o *back-end* e o *front-end*.

4.2.1 Aplicação em Segundo Plano (Back-end)

A aplicação de segundo plano, *back-end*, foi desenvolvida em um servidor que recebe os dados transmitidos pelo sensor óptico de temperatura. Os dados de temperatura serão obtidos através de medições realizadas em períodos pré-programados e transmitidos para a aplicação de segundo plano. Dessa forma, o servidor irá receber um pacote do nó sensor de temperatura com os seguintes campos: identificação do nó sensor, temperatura da conexão, hora, minuto, segundo, dia, mês e ano.

Uma das principais funções da aplicação de segundo plano é sempre estar disponível para realizar a recepção do pacote de dados enviados pelos nós sensores. É interessante ressaltar que o sistema deve ser escalável, ou seja, deve permitir a expansão da rede e, consequentemente, a inclusão de novos nós sensores sem prejuízo da sua performance e desempenho. Para isso, é importante que as configurações do servidor sejam suficientes para permitir essa característica.

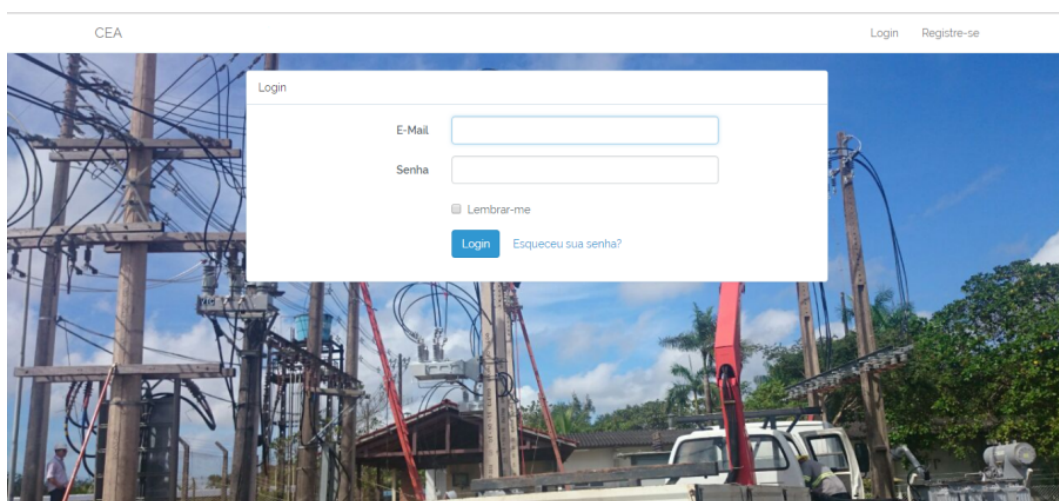
O servidor proposto irá executar o serviço em plano de fundo com um script rodando o *framework* Nodejs, uma variação da linguagem JavaScript^o, que cria um socket no porta 3001 e fica aguardando novas requisições. Quando há uma nova conexão cliente-servidor, a função do servidor é aguardar um pacote de dados contendo as informações enviadas

pelo nós sensores, estas informações serão armazenadas no banco de dados que é feito em MongoDB, um banco de dados não relacional.

4.2.2 Aplicação Web (*Front-End*)

Na etapa de desenvolvimento do *front-end* foram desenvolvidas diversas interfaces e páginas que compõem a plataforma de monitoramento. Dessa forma, neste tópico serão apresentados as principais interfaces do sistema remoto de monitoramento proposto e suas respectivas funções. É importante ressaltar, que a página *web*, ou *front-end* compõe a parte do projeto que interage diretamente com o usuário. Neste projeto, o operador do sistema irá ser notificado com alertas e gráficos sobre o monitoramento das conexões elétricas. Pensando nisso, é importante que os operados sejam registrados no sistema para obter acesso à tela de monitoramento.

Figura 23 – Plataforma de Monitoramento (Tela de Login)

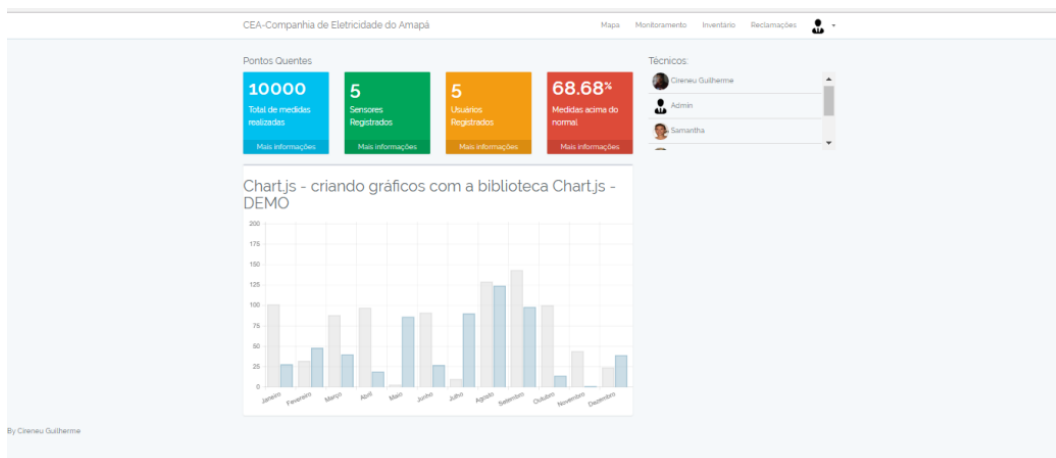


Fonte: Autor

Na tela de entrada, apresentada na Figura 23, é possível registrar ou, caso o técnico responsável já possua acesso, entrar no sistema de monitoramento. É interessante salientar que, para realizar o cadastro de um novo usuário é necessário possuir a autorização do administrador do sistema e informar os dados pessoais do novo técnico, tais como: nome completo, número do CPF, número da identidade, e-mail e uma senha. Após o cadastro, o novo usuário receberá a confirmação do sistema e terá total acesso ao sistema de monitoramento de pontos quentes da concessionária.

Na página inicial, apresentada na Figura 24, ao lado direito encontra-se a lista de todos os técnicos da concessionária com acesso ao sistema. No centro da página é possível observar as caixas coloridas que informam de maneira rápida e intuitiva o total de medidas do sistema, o número de sensores cadastrados e o número de pontos quentes na rede elétrica da concessionária. Além disso, para realizar uma análise do histórico por

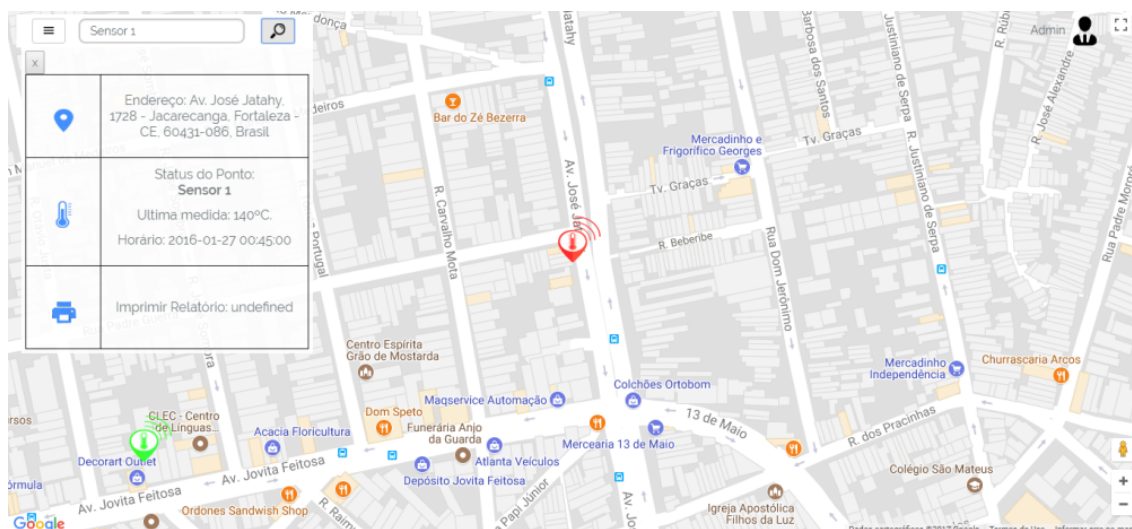
Figura 24 – Plataforma de Monitoramento (Tela Inicial)



Fonte: Autor

ponto, abaixo das caixas coloridas encontra-se o gráfico que irá fornecer um panorama genérico das medidas de temperatura em relação aos dias, semanas ou meses.

Figura 25 – Plataforma de Monitoramento (Tela Geográfica)



Fonte: Autor

Na página do mapa é possível realizar uma consulta em uma localização geográfica da rede elétrica da distribuidora. Nesta página são apresentados através de ícones coloridos todos os pontos de instalação do sensor óptico de temperatura e seus respectivos nível de temperatura. Os ícones verdes, amarelos e vermelhos representam os níveis normais, limítrofes e críticos, respectivamente. Na Figura 25 é apresentada a página do mapa sendo possível verificar diversos sensores e seus locais de instalação dentro da rede da concessionária. Além disso, a página possui um menu de buscas rápidas que podem facilitar o acesso a um sensor óptico na rede de distribuição da concessionária, quando selecionado, a

aplicação *web* irá apresentar as últimas medidas de temperatura realizadas, sua localização geográfica e o endereço específico onde o equipamento foi instalado.

Figura 26 – Tabela com os sensores cadastrados

Nome	Selecionar
☐ Sensor 1	Ver medidas Ver no mapa
☐ Sensor 2	Ver medidas Ver no mapa
☐ Sensor 3	Ver medidas Ver no mapa
☐ Sensor 4	Ver medidas Ver no mapa
☐ Sensor 5	Ver medidas Ver no mapa

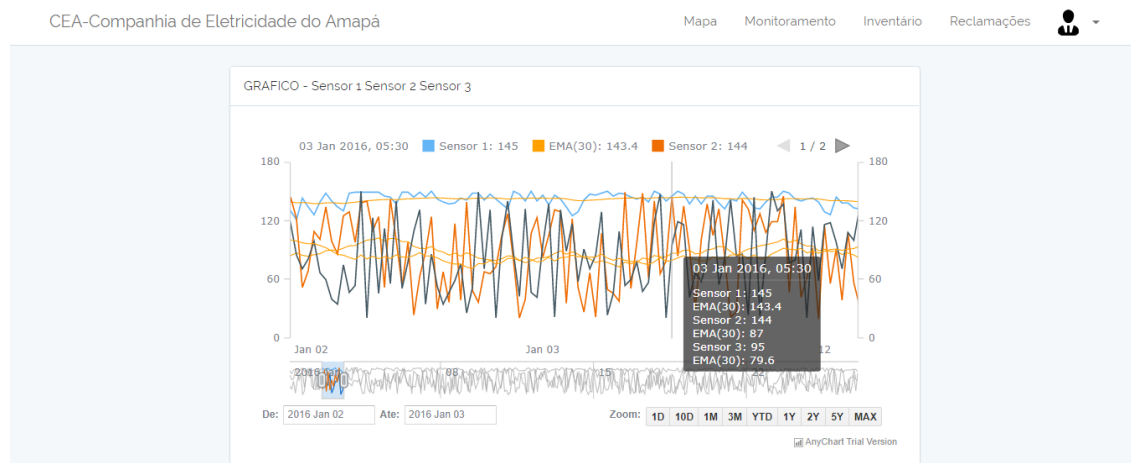
Fonte: Autor

Na página de monitoramento, apresentada na Figura 26 todos os sensores são listados em uma tabela. Caso seja importante, é possível marcar um ou mais sensores para detalhar suas medidas plotadas, em um gráfico, podendo realizar uma análise comparativa de dois pontos da rede elétrica. Além disso, o sistema também suporta uma análise comparativa das medidas de um mesmo sensor em diferentes dias da semana, pois fatores como desbalanceamento de carga ou sobrecarga, podem influenciar na temperatura de uma conexão elétrica. Dessa forma, será possível comparar as medidas de um mesmo sensor considerando apenas um dia específico da semana, analisando a variação de temperatura apenas em um dia e hora específica.

Na Figura 27 é apresentado um gráfico comparativo entre diversos sensores cadastrados na plataforma. Com essa ferramenta, é possível comparar os resultados de dois pontos, consequentemente será possível criar uma análise qualitativa das conexões elétricas, pois sensores instalados em um mesmo transformador, em teoria, estão balanceados e possuem temperatura semelhantes. Entretanto, caso as conexões estejam com temperaturas diferentes, é necessário que o operador do sistema realize uma manutenção no local para averiguar, ou não, a existência do ponto quente na rede elétrica.

Na página de inventário, Figura 28, é possível incluir novos nós sensores de temperatura ao sistema remoto de monitoramento. Para isso é necessário que o técnico responsável cadastre os seguintes dados: identificação do sensor, endereço de instalação, tipo de conexão, temperatura máxima de operação e temperatura limite para alerta, de acordo com as normas da concessionária. Além disso, será possível excluir os sensores já cadastrados e

Figura 27 – Gráfico comparativo entre sensores



Fonte: Autor

Figura 28 – Gerenciamentos dos sensores instalados

Nome	Endereço	Tipo	Opções
Sensor 1	Av. José Jatahy 17.	Convencional	Editar, Excluir
Sensor 2	R. Damião Fernan.	Fibra ótica	Editar, Excluir
Sensor 3	Rua Dr. Abdenago ..	Aquático	Editar, Excluir
Sensor 4	Av. Jovita Feitosa ..	Fibra ótica	Editar, Excluir
Sensor 5	Rua Dom Lino. 25.	Convencional	Editar, Excluir

Fonte: Autor

realizar alterações dos dados do sensor, caso necessário.

Como mencionado, a principal função da aplicação *web*, ou seja, *front-end* da plataforma de monitoramento, é criar uma interface amigável e intuitiva para o manuseio dos técnicos da concessionária. O sistema deve propor uma solução de monitoramento de simples operação, tornando o sistema apto a ser instalado pela concessionária, tornando-a uma rede elétrica inteligente, capaz de realizar análises de padrões fora do comum e criar alertas automáticos para visualização rápida dos técnicos responsáveis.

5 Conclusões

Nesse trabalho foi proposto um sistema remoto de monitoramento de pontos quentes em conexões elétricas utilizando sensores ópticos. A confecção do projeto foi dividido em três partes, a primeira parte referente à construção do sensor óptico de temperatura, a segunda parte referente ao sistema embarcado que recepcionaria os dados do sensor e a terceira referente à plataforma web de monitoramento. Nesse contexto, é importante salientar que todas as etapas foram concluídas com êxito.

Inicialmente, foram realizadas estudos analíticos e de simulação para prever os resultados esperados nos experimentos em laboratório. Como apresentado, os resultados obtidos para o sistema de interrogação do sensor de temperatura foram compatíveis aos encontrados nos experimentos reais realizados em laboratório, demonstrando êxito na reprodução do sistema.

Na etapa de construção do sensor óptico de temperatura foi observado a presença do efeito da histerese em FBGs quando aplicadas a variação de temperatura. Entretanto, os efeitos da histerese em FBGs são reduzidos quando a variação de temperatura do ponto ocorrer de forma lenta. Todavia, esse efeito possui relevância para a construção do sensor e será considerado com o objetivo de melhorar a performance do sensor óptico.

Em paralelo, foi desenvolvido um sistema de mediação para realizar a interface do sensor óptico e aferir medidas de temperaturas em grandezas universais. Além disso, o sistema realizava as transmissões periódicas das leituras capturadas pela placa de medição para o servidor *web* hospedado na Internet.

A plataforma *web* de monitoramento desenvolvida atua recebendo os dados da placa de medição e armazenando-os em um banco de dados para, posteriormente, apresentá-los em uma página na Internet. Além disso, a plataforma web realiza alertas, apresenta gráficos de variação da variação de temperatura de determinados pontos, apresenta os nós sensores em um mapa georeferenciado, informa as temperaturas dos principais pontos analisados e realiza o cadastro de novos nós sensores.

Nesse ponto é interessante salientar que todos as etapas do projeto proposto foram concluídas.

5.1 Trabalhos futuros

As perspectivas para trabalhos futuros são:

- Realizar a integração do sistema proposto, agregando o sensor óptico de temperatura,

o sistema de medição e sistema de monitoramento a um mesmo produto.

- Testar o equipamento em campo na Companhia de Eletricidade do Amapá (CEA) para validar a integração do sistema.
- Incluir no sistema um medidor de corrente elétrica para determinar, em conjunto, a temperatura e a potência dissipada pela conexão.
- Aplicar técnicas de inteligência artificial para analisar de forma automática as possíveis causas relacionadas ao aquecimento da conexão elétrica

Referências

- AGRAWAL, G. P. **Fiber-optic communication systems**. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2012. v. 222.
- ALLAN, W. R. et al. Multiplexed fiber bragg grating interrogation system using a microelectromechanical fabry-perot tunable filter. **IEEE Sensors Journal**, IEEE, v. 9, n. 8, p. 936–943, 2009.
- AMIN, S. M.; WOLLENBERG, B. F. Toward a smart grid: power delivery for the 21st century. **IEEE power and energy magazine** — v. 3, n. 5, p. 34–41, 2005. Acesso em: 9 out. 2019.
- ANEEL. **ANEEL - Resolução Normativa 669**. 2015. Disponível em: <https://www.google.com.br/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=2&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwuiq6O1panlAhVKVK0KHYDCCRkQFjABegQIBBAC&url=http%3A%2F%2Fwww2.aneel.gov.br%2Faplicacoes%2Faudiencia%2Farquivo%2F2014%2F022%2Fresultado%2Fren2015669.pdf&usg=AOvVaw3k_nmnF_mC-k6XSfO5mc08>. Acesso em: 09 out. 2019.
- ANEEL. **ANEEL - Consumo de Energia**. 2019. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/arquivos/pdf/atlas_par1_cap2.pdf>. Acesso em: 09 out. 2019.
- ANEEL. **ANEEL - Relatório de Perdas de Energia Elétrica na Distribuição**. 2019. Disponível em: <https://www.aneel.gov.br/documents/654800/18766993/Relat%C3%B3rio+Perdas+de+Energia_+Edi%C3%A7%C3%A3o+1-2019-02-07.pdf/d7cc619e-0f85-2556-17ff-f84ad74f1c8d>. Acesso em: 09 out. 2019.
- ANEEL. **Indicadores de Qualidade Energia FEC e DEC**. 2019. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/indicadores-coletivos-de-continuidade>>. Acesso em: 09 out. 2019.
- ANEEL. **MME - Relatório de Smart Grids no Brasil**. 2019. Disponível em: <http://www.mme.gov.br/documents/10584/1256641/relatxrio_gt_smart_grid_portaria_440-2010.pdf/3661c46c-5f86-4274-b8d7-72d72e7e1157>. Acesso em: 09 out. 2019.
- ARELLANO, M. H.; HERNÁNDEZ, L. M. Electrical applications of infrared thermography: A review. **Parameters**, v. 50, p. 24–6, 2015. Acesso em: 9 out. 2019.
- ARKWRIGHT, J. W. et al. Measurement of muscular activity associated with peristalsis in the human gut using fiber bragg grating arrays. **IEEE Sensors Journal**, IEEE, v. 12, n. 1, p. 113–117, 2011.
- BAGAVATHIAPPAN, S. et al. Infrared thermography for condition monitoring a review. **Infrared Physics Technology** — 60, p. 35–55, 2013. Acesso em: 9 out. 2019.
- EADS, L.; EPPERLY, R.; SNELL, J. Thermography. **ASHRAE Journal**, n. 42, p. 51–55, 2000. Acesso em: 9 out. 2019.

- ENERGY, D. U. D. of. The smart grid: an introduction. **Prepared for the Department of Energy by Litos Strategic Communication under contract No. DE-AC26-04NT41817** — Subtask 560.01.04, Washington, Estados Unidos, p. páginas, 2009. Acesso em: 9 out. 2019.
- GIJBELS, A. et al. Development and experimental validation of a force sensing needle for robotically assisted retinal vein cannulations. In: IEEE. **2015 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)**. [S.l.], 2015. p. 2270–2276.
- HUDA, A. N.; TAIB, S. Application of infrared thermography for predictive/preventive maintenance of thermal defect in electrical equipment. **Applied Thermal Engineering**, Elsevier, v. 61, n. 2, p. 220–227, 2013. Acesso em: 9 out. 2019.
- JADIN, M. S.; TAIB, S. et al. Evaluating the thermal condition of electrical equipment via irt image analysis. In: **Proceedings of The Annual International Conference, Syiah Kuala University-Life Sciences & Engineering Chapter**. [S.l.: s.n.], 2012. v. 2, n. 2.
- JR., B. R. L.; ORLOVE, G. L.; PETERS, D. L. The relationship between current load and temperature for quasisteady state and transient conditions. **InfraMation**, 2002. Acesso em: 9 out. 2019.
- KASHYAP, R. **Fiber bragg gratings**. [S.l.]: Academic press, 2009.
- KASINATHAN, M. et al. Hotspot monitoring in transformers using fiber bragg grating. **International Conference on Fiber Optics and Photonics**, 2012. Acesso em: 9 out. 2019.
- LAMIN, H. Análise de impacto regulatório da implantação de redes inteligentes no brasil. **Tese de Doutorado em Engenharia Elétrica**, Dep. de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, p. 300p, 2005. Acesso em: 9 out. 2019.
- LIU, Y. et al. Design and performance test of transformer winding optical fibre composite wire based on raman scattering. **Sensors**, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 19, n. 9, p. 2171, 2019.
- MATIKAINEN, L. et al. Remote sensing methods for power line corridor surveys. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, Elsevier, v. 119, p. 10–31, 2016.
- MOURA, D. F. P. de; MORAIS, T. C. M. de. Adequação das conexões em subestações para redução de pontos quentes. **Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos**, Foz do Iguaçu – PR, Brasil, 2014. ISSN 2177-6164. Acesso em: 9 out. 2019.
- NATIONAL INSTRUMENTS. **National Instruments**. 2019. Disponível em: <https://www.ni.com/pt-br/innovations/white-papers/13/sensor-terminology.html>. Acesso em: 09 out. 2019.
- NICOLA, M. et al. Monitoring system for power transformer windings hot spot temperature using fiber optic sensors, kalman filter and integration in scada system. **American Journal of Signal Processing**, v. 2, n. 8, p. 33–44, 2018. ISSN DOI: 10.5923/j.ajsp.20180802.02. Acesso em: 9 out. 2019.

- ONS. **Extensão Rede Elétrica de Transmissão no Brasil**. 2019. Disponível em: <<https://cbie.com.br/artigos/quantos-quilometros-de-linha-de-transmissao-de-energia-temos-no-brasil>>. Acesso em: 09 out. 2019.
- QIU, Y. et al. Review on composite structural health monitoring based on fiber bragg grating sensing principle. **Journal of Shanghai Jiaotong University (Science)**, Springer, v. 18, n. 2, p. 129–139, 2013.
- SABRI, N. et al. Toward optical sensors: Review and applications. In: IOP PUBLISHING. **Journal of Physics: Conference Series**. [S.l.], 2013. v. 423, n. 1, p. 012064.
- SHI, Z.; BOYD, R. W. Fundamental limits to slow-light arrayed-waveguide-grating spectrometers. **Optics express**, Optical Society of America, v. 21, n. 6, p. 7793–7798, 2013.
- SNELDERS, D.; BOERSMA, A. Development of thermostable fbg optical sensor for oil and gas applications. In: **Proceedings of the 8th International Conference on Sensing Technology**. [S.l.: s.n.], 2014. p. 278–281.
- THORLABS. **Thorlabs - Circulator**. 2019. Disponível em: <https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=373>. Acesso em: 09 out. 2019.
- THORLABS. **Thorlabs - Photodiode**. 2019. Disponível em: <https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=285>. Acesso em: 09 out. 2019.
- ULLAH, I. et al. Predictive maintenance of power substation equipment by infrared thermography using a machine-learning approach. **Energies**, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 10, n. 12, p. 1987, 2017.
- VALENTE, L. C. G. et al. Combined time and wavelength multiplexing technique of optical fiber grating sensor arrays using commercial otdr equipment. **IEEE Sensors Journal**, IEEE, v. 3, n. 1, p. 31–35, 2003.
- WRONKOWICZ, A. Approach to automated hot spot detection using image processing for thermographic inspections of power transmission lines. **DIAGNOSTYKA**, v. 17, n. 2, 2016. ISSN 1641-6414. Acesso em: 9 out. 2019.
- YIN, S.; RUFFIN, P. Fiber optic sensors. **Wiley Encyclopedia of Biomedical Engineering**, Wiley Online Library, 2006.
- YU, F.; YIN, T. S.; RUFFIN, S. **Fiber Optic Sensors**. Estados Unidos da América: CRC Press Taylor e Francis Group, 2006. ISBN 9781420053654.
- ZHAN, Y.; XUE, S.; YANG, Q. Multiplexed reflective-matched optical fiber grating interrogation technique. **Chinese Optics Letters**, Chinese Optical Society, v. 5, n. 3, p. 135–137, 2007.
- ZHANG, H. et al. Application of infrared image recognition technology in electrical equipment. **DEStech Transactions on Engineering and Technology Research**, n. iceta, 2016.
- ZHONG, Z. Y.; ZHI, X. L.; YI, W. J. Oil well real-time monitoring with downhole permanent fbg sensor network. In: IEEE. **2007 IEEE International Conference on Control and Automation**. [S.l.], 2007. p. 2591–2594.