



**Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais
Unidade Araxá**

Diego Alberto dos Reis Militão

**Análise de utilização de Fibra Óptica 5/125 como sensor para
monitoramento de temperatura**

Araxá-MG
2023

Diego Alberto dos Reis Militão

**Análise de utilização de Fibra Óptica 5/125 como sensor para
monitoramento de temperatura**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia de Automação Industrial, do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - Unidade Araxá, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia de Automação Industrial.

Orientador: Prof. Me. Sérgio Luiz Pithan

Araxá-MG
2023



ATA Nº 89 / 2023 - DELMAX (11.57.05)

Nº do Protocolo: 23062.060615/2023-61

Araxá-MG, 11 de dezembro de 2023.

Ata de Defesa do Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia de Automação Industrial do Aluno Diego Alberto dos Reis Militão

Às dezesseis horas do dia sete de dezembro de dois mil e vinte e três, reuniu-se, no Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET-MG/ Campus Araxá, a Comissão Examinadora de Trabalho de Conclusão de Curso para julgar, em exame final, o trabalho intitulado **ANÁLISE DE UTILIZAÇÃO DE FIBRA ÓPTICA MONOMODO 9/125 COMO SENSOR PARA MONITORAMENTO DE TEMPERATURA**, como requisito parcial para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia de Automação Industrial. Abrindo a sessão, o Presidente da Comissão, Prof. Dr. Sérgio Luiz da Silva Pithan, após dar a conhecer aos presentes o teor das Normas Regulamentares do Trabalho Final, concedeu a palavra ao candidato, **Diego Alberto dos Reis Militão**, para a exposição de seu trabalho. Após a apresentação, seguiu-se a arguição pelos examinadores, com a respectiva defesa do candidato. Ultimada a arguição, a Comissão se reuniu, sem a presença do candidato e do público, para julgamento e expedição do resultado final. Após a reunião da Comissão Examinadora, o candidato foi considerado: **APROVADO**, obtendo nota final de: 80/100 (**oitenta**). O resultado final foi comunicado publicamente ao candidato pelo Presidente da Comissão. O aluno, abaixo assinado, declara que o trabalho ora identificado é da sua autoria material e intelectual, excetuando-se eventuais elementos, tais como passagens de texto, citações, figuras e datas, desde que devidamente identificada a fonte original. Declara ainda, neste âmbito, não violar direitos de terceiros. Nada mais havendo a tratar, o Presidente encerrou os trabalhos. O Prof. Leandro Resende Mattioli, responsável pela disciplina "Trabalho de Conclusão de Curso II", lavrou a presente ATA, que, após lida e aprovada, será assinada por todos os membros participantes da Comissão Examinadora e pelo candidato.

Araxá, 07 de dezembro de 2023.

Assinado eletronicamente por:

- Presidente e Orientador: Prof. Dr. Sérgio Luiz da Silva Pithan
- Membro Titular: Prof. Dr. Kleber Lopes Fontoura
- Membro Titular: Prof. Me. Alexandre Dias Linhares
- Professor da Disciplina TCC 2: Prof. Dr. Leandro Resende Mattioli
- Aluno: Diego Alberto dos Reis Militão

(Assinado digitalmente em 11/12/2023 13:28)
ALEXANDRE DIAS LINHARES
PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO
CTMECAX (11.50.19)
Matrícula: 1164526

(Assinado digitalmente em 14/12/2023 16:36)
KLEBER LOPES FONTOURA
PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO
DELMAX (11.57.05)
Matrícula: 2330904

(Assinado digitalmente em 11/12/2023 20:33)
LEANDRO RESENDE MATTIOLI
PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO
DELMAX (11.57.05)
Matrícula: 2973183

(Assinado digitalmente em 11/12/2023 15:29)
SERGIO LUIZ DA SILVA PITHAN
PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO
CEAIX (11.51.16)
Matrícula: 2121424

(Assinado digitalmente em 11/12/2023 16:41)
Diego Alberto dos Reis Militão
DISCENTE
Matrícula: 201514550156

Visualize o documento original em <https://sig.cefetmg.br/public/documentos/index.jsp> informando seu número: **89**, ano: **2023**, tipo: **ATA**, data de emissão: **11/12/2023** e o código de verificação: **bfb07c60d9**

AGRADECIMENTOS

À Deus pela minha vida e por ter me ajudado a superar os obstáculos nesse tempo de graduação.

A minha família que sempre me apoiou nos estudos principalmente minha mãe que sempre batalhou sozinha por um futuro para seus filhos.

Ao professor Sérgio Luiz da Silva Pithan que aceitou a ideia do trabalho e me auxiliou ao longo do fim da jornada do curso.

Aos professores, não só aqueles que aceitaram o convite para participar da banca de defesa desta monografia e também aqueles que passaram pelo menos um pouco do conhecimento para todos os estudantes nesse curso.

E por último, mas não menos importante, aos meus colegas de classe que mostraram que sozinho não chegamos a lugar algum e um amigo é sempre bem-vindo.

“Irmão, você não percebeu
Que você é o único representante
Do seu sonho na face da terra
Se isso não fizer você correr, chapa
Eu não sei o que vai.”

Emicida – Levanta e Anda.

RESUMO

A tecnologia da fibra óptica atualmente está bem conectada na vida de diversas pessoas, principalmente devido a maioria dos meios de internet doméstica utilizarem essa tecnologia. A mesma acaba sendo conhecida por várias pessoas. Uma das versatilidades é sua utilização como sensor, principalmente na indústria. Alguma variável de processo pode ser levantada e avaliada, com a análise em mãos, ser tratada e gerar um sinal de controle ou alarme. O objetivo central deste trabalho é abordar e analisar um conceito geral sobre as fibras ópticas e o seu emprego como sensor. A temperatura é a grandeza eleita para ser monitorada. Utilizando de experiências práticas conduzidas em laboratório e coletando dados. A fibra, por suas características e propriedades superiores as fibras Multimodo, foi escolhida como objeto desse estudo. O comportamento da fibra como sensor não é muito conhecido, mas feito o estudo é possível correlacionar os resultados com a fibra *Dual Clad*.

Palavras-chave: Fibra óptica; Sensores; Temperatura; Tipos de fibra; Análise;

ABSTRACT

Fiber optic technology is currently well connected in the lives of many people, mainly due to the majority of home internet methods using this technology. It ends up being known by several people. One of its versatilities is its use as a sensor, mainly in industry. Some process variable can be raised and evaluated, with the analysis in hand, be treated and generate a control or alarm signal. The central objective of this work is to address and analyze a general concept about optical fibers and their use as sensors. Temperature is the quantity chosen to be monitored. Using practical experiments conducted in the laboratory and collecting data. Single mode fiber, due to its characteristics and properties superior to Multimode fibers, was chosen as the object of this study. The behavior of single-mode fiber as a sensor is not well known, but once the study is done it is possible to correlate the results with Dual-Clad fiber.

Keywords: Optical fiber; Sensors; Temperature; Types of fiber; Analysis;

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Exemplo de experimento observado por Tyndall.	14
Figura 2 - Ilustração do corpo de uma fibra óptica.	17
Figura 3 - Ilustração de um cabo de fibra óptica.	18
Figura 4 - Demonstração de reflexão parcial.	19
Figura 5 - Exemplo de propagação da luz na fibra.	21
Figura 6 - Gráfico - atenuação x comprimento de onda - janelas ópticas.	22
Figura 7 - Exemplo de dispersão: um raio refrata e vai para o meio 2 e o outro reflete e continua no núcleo.	23
Figura 8 - Exemplo de propagação de uma fibra	24
Figura 9 – Exemplo de propagação de uma fibra Multimodo de índice degrau.	25
Figura 10 - Exemplo de propagação de uma fibra Multimodo de índice gradual.	25
Figura 11 - Esquema de sensor extrínseco.	29
Figura 12 - Esquema de sensor intrínseco.	29
Figura 13 - Exemplo de configuração de sensor pontual.	30
Figura 14 - Exemplo de configuração de sensor multiponto.	30
Figura 15 - Exemplo de configuração de sensor distribuído.	31
Figura 16 - Representação do corpo da fibra Dual Clad.	34
Figura 17 - Exemplo de propagação em fibra Dual Clad.	35
Figura 18 - Exemplo de estufa utilizada no experimento.	36
Figura 19 - Powermeter e caneta óptica utilizadas	37
Figura 20 - Sensor de temperatura PT100.	38
Figura 21 - Tela de interface do programa pelo celular	39
Figura 22 - Medição de intensidade de luz realizada	40
Figura 23 - Gráfico de análise de variação de luz pela temperatura	44
Figura 24 - Gráfico de janelas ópticas utilizadas na experiência	44

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Linha de desenvolvimento da tecnologia óptica.	15
Tabela 2 - Modulação e variáveis de um sensor de intensidade.	32
Tabela 3 - - Modulação e variáveis de um sensor interferométrico	33
Tabela 4 - Análise de dados com comprimento de onda de 1310nm	42
Tabela 5 - Taxa de variação de temperatura com comprimento de onda de 1310nm.....	43
Tabela 6 - Taxa de variação de temperatura com comprimento de onda de 840nm	45

Sumário

1	INTRODUÇÃO.....	10
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	13
2.1	Histórico da evolução das fibras ópticas	13
2.2	Fibra óptica.....	17
2.2.1	Componentes das fibras	17
2.2.2	Princípios de funcionamento das fibras	18
2.3	Tipos de Fibra.....	22
2.4	Vantagens e Desvantagens gerais no uso das fibras ópticas	25
2.5	Sensores à base de fibra óptica	27
2.5.1	Classificação por transdução	28
2.5.2	Classificação por distribuição	29
2.5.3	Classificação quanto a modulação.....	31
2.6	Fibra <i>Dual Clad</i>	34
3	Materiais e métodos.....	36
3.1	Tomada de dados	39
4	Resultados e discussões	42
5	considerações finais.....	46
	REFERÊNCIAS.....	48

1 INTRODUÇÃO

A transmissão de dados, nos tempos atuais, tem passado por constantes pesquisas e, conseqüentemente, grandes avanços. A garantia de acesso aos dados nos locais corretos, com segurança e da maneira mais rápida possível, sempre foi um atrativo para todos os setores, desde a indústria, passando pela medicina, chegando até mesmo, ao setor militar. Sobre isso, segundo Keiser (2014), a necessidade de propagar informações de forma rápida, segura e com uma grande quantidade de dados propiciou o desenvolvimento de novas tecnologias. Dentre as tecnologias desenvolvidas, a que mais se destacou e se destaca até hoje é a fibra óptica, a qual fornece, além das características supracitadas, baixa interferência a ruídos e pequenas dimensões.

De acordo com Rodrigues (2018), as fibras ópticas compreendem uma tecnologia nova, apesar da criação de seu primeiro protótipo datar da década de 70. Nesses 50 anos de história, diversos pesquisadores têm se empenhado em aprimorar os usos e as qualidades dessa tecnologia. A fibra óptica hoje é grandemente utilizada como meio de transmissão da internet das casas até as redes industriais, porém ela também tem uma vasta lista de aplicação, haja vista seus vários tipos e suas diversas particularidades de funcionamento.

Dentre as fibras ópticas mais comuns, encontram-se a Multimodo cujos componentes internos apresentam características específicas que podem ser abordadas de maneiras diferentes, como as fibras de perfis com casca interna rebaixada, com casca interna levantada e as com dupla casca (GIOZZA; CONFORTI; WALDMAN, 1991). As fibras Multimodo possuem diâmetro do núcleo maior em comparação com as Monomodo, sendo recomendadas em distâncias menores entre transmissor e receptor quando comparadas às Monomodo. As fibras ópticas Monomodo possuem um diâmetro do núcleo bastante reduzido, o que evita perdas e maior velocidade de propagação da luz, sendo empregadas em longas distâncias.

Conforme ponderado, as fibras são subdivididas em perfis, sendo eles: com casca interna rebaixada, com casca interna levantada e as com dupla casca. Dessas tecnologias, nesta pesquisa, focaliza-se especificamente nas fibras perfil dupla casca. Essas fibras, conforme salientado, são muito empregadas em aplicações de comunicação, contudo, possuem um grande potencial de utilização em outras áreas como, por exemplo, na industrial. Como se sabe, na indústria, há sempre a necessidade de aprimorar a tecnologia no controle e na produção de bens e serviços, buscando um bom custo benefício e, acima

de tudo, gerando lucros. Em relação ao sensoriamento das variáveis de processo, que é muito importante para qualquer indústria, o estudo de novas tecnologias é sempre bem-vindo.

Desse sensoriamento, conforme Bega *et al.* (2006), a medição de temperatura compreende uma das variáveis mais importantes de um processo industrial, dado que pode servir de base desde o setor de produção até a segurança de algum componente. Hoje, os principais instrumentos utilizados para a medição de temperatura no setor industrial são os termômetros, que ficam em contato direto com a variável, e os pirômetros, que medem por radiação - à distância. Os termômetros são os mais utilizados, principalmente, os termopares e as termo resistências.

Ante a essa contextualização, o objeto geral deste trabalho é: implementar um método para a medição de temperatura, em processos industriais, por meio da fibra óptica com dupla casca. O interesse por este estudo surge em decorrência do seguinte questionamento de pesquisa: é possível implementar um método para medição de temperatura, em processos industriais, utilizando fibra óptica como dupla casca? Em vista desse questionamento, aventa-se como hipótese de pesquisa que é possível implementar esse método, de modo a propiciar mais uma alternativa industrial no campo da medição de temperatura, empregando fibra óptica com dupla casca, com vistas a superar algumas desvantagens que os atuais medidores possuem, como: o alto tempo de resposta, a fragilidade mecânica e a menor resistência em alguns ambientes hostis. Logo, acredita-se que a implementação desse método propiciará resultados melhores no monitoramento de temperatura a longas distâncias, devido às vantagens das fibras ópticas, como confiança, leveza e baixo custo.

Em vista disso, estabeleceu-se como objetivos específicos deste trabalho:

- Observar o funcionamento da fibra óptica Monomodo e suas diferenças de funcionamento em relação as demais fibras;
- Entender o funcionamento da fibra óptica como sensor e não só como meio de transmissão;
- Observar a influência da temperatura quanto às propriedades desse tipo de fibra;
- Verificar se a fibra Monomodo é propícia pra esse tipo de emprego.
- Identificar as vantagens e as desvantagens da aplicação da fibra óptica Monomodo no monitoramento de temperatura em processos industriais.

A execução desta pesquisa se justifica na medida em que, na literatura, há poucas pesquisas voltadas a essa temática. Ademais, busca-se averiguar a funcionalidade das fibras Monomodo como sensor de temperatura. Em outros termos, intenta-se analisar se a funcionalidade dessa tecnologia pode ser expandida para além dos sistemas de comunicação, sendo empregada, nesse caso, no monitoramento de uma variável que é essencial para os processos industriais. Pretende-se, assim, utilizar as características únicas das fibras Monomodo para observar seus efeitos quando empregadas como sensor.

Entre os trabalhos que se relacionam com este, cita-se a pesquisa de Elias (2012). No qual o autor, pioneiro na utilização, das fibras *Dual Clad* como sensor, As fibras ópticas *Dual Clad* apresentam propriedades otimizadas que se relacionam com as propriedades das fibras Monomodo. Além do trabalho de Elias (2012), cita-se, ainda, pesquisas que lidam com outros tipos de fibra, como os vistos em Silva Júnior (2016) e Silva (2018), que utilizam fibras ópticas mais comumente adotadas nas comunicações, para o estudo do comportamento como sensores.

Para a realização e a implementação do método proposto, lança-se mão, nesta pesquisa, da aplicação de testes nos quais se emprega a fibra óptica Monomodo como sensor de temperatura. Esses testes são realizados com o auxílio de componentes eletrônicos, tais como: analisadores ópticos, geradores de sinais e amplificadores para a criação de sinais ópticos dentro do núcleo da fibra óptica. Busca-se, assim, observar as perturbações geradas com a variação de temperatura provocada. A análise dos testes focaliza a reação da curvatura da fibra com a variável implementada, observando as perdas do sinal de acordo com o raio em que a fibra está submetida e realizando um paralelo com as temperaturas atuais no momento do experimento.

A fim de realizar a investigação aqui apresentada, este trabalho está estruturado em três capítulos, além desta introdução e das considerações finais. No segundo capítulo, apresenta-se a fundamentação teórica desta pesquisa, na qual os principais conceitos implicados nessa proposta são descritos, entre eles, cita-se um breve histórico sobre as fibras ópticas, passando pela sua composição e tipos, além da sua relação com sensoreamento e uma breve descrição de fibras dupla casca. No terceiro capítulo, detalha-se os materiais e métodos empregados para que a pesquisa fosse realizada laboratorialmente e proporcionasse os resultados utilizado neste estudo de caso. No quarto capítulo, analisa-se os dados coletados antes e depois dos testes aplicados e discute-se os resultados obtidos.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

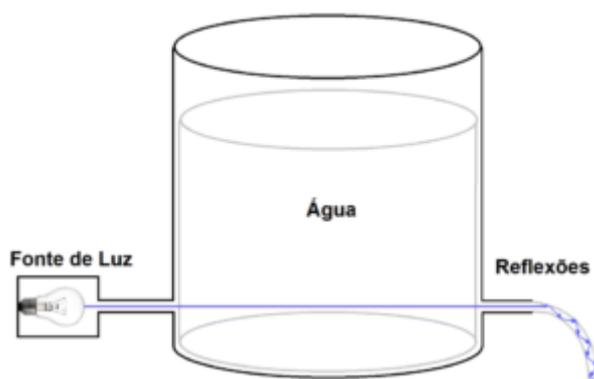
Neste capítulo, detalha-se os principais conceitos relacionados à proposta em tela, para tanto, discorre-se sobre: (i) o histórico de evolução das fibras ópticas; (ii) as características das fibras ópticas: seus componentes e os princípios de funcionamento; (iii) os tipos de fibra; (iv) as vantagens e as desvantagens gerais das fibras ópticas; (v) os sensores à base de fibra óptica; e (vi) as fibras Monomodo e *Dual Clad*.

2.1 Histórico da evolução das fibras ópticas

Segundo Giozza, Conforti e Waldman (1991), os primeiros sistemas mais elaborados de transmissão óptica começaram a ser desenvolvidos a partir do século XVIII, com a invenção do *semaphore*, que foi o primeiro sistema de comunicação digital de alta velocidade. Posteriormente a esse, foi criado, por Graham Bell, o *photophone*, tecnologia pioneira nas comunicações ópticas analógicas. Esses dois inventos têm, em comum, além do uso da luz, a transmissão apenas pela atmosfera, sem nenhum outro meio condutor.

Em 1870, o pesquisador John Tyndall desenvolveu pesquisas relacionadas aos fenômenos ópticos. Esses estudos se iniciaram antes da Primeira Guerra Mundial, ou seja, muito antes de qualquer computador ser sequer imaginado. Tyndall, em suas pesquisas, se contrapôs à hipótese de que a luz era indobrável, retilínea e constante. A fim de demonstrar os resultados obtidos em suas análises, Tyndall realizou uma apresentação no *Royal Palace* no Reino Unido. Nela, com o auxílio de uma lanterna dentro de um recipiente opaco e com água, ele mostrou que a luz podia, sim, fazer curvas. Com essa experiência, o pesquisador confirmou sua hipótese e desbancou uma regra física que perdurou por séculos. A Figura 1 ilustra o experimento de Tyndall, com a luz sendo refratada de forma não linear ao ser propagada em um meio diferente do ar.

Figura 1 - Exemplo de experimento observado por Tyndall.



Fonte: Arantes (2018, p. 10).

Os conhecimentos descobertos por Tyndall, segundo Rodrigues (2018), eram muito avançados para a sua época e só voltaram a ser colocados em questão no século seguinte, com as pesquisas do indiano Narinder Singh Kapany, o qual estudou a reflexão total, isto é, o fenômeno em que as ondas de luz são refletidas em um meio.

Kapany, de acordo com Meyer (2015), executava seus experimentos em diversos meios, procurando o material com menor índice de refração para, assim, a luz ficar refletida diretamente, independente do ângulo de incidência, de forma que o material funcionasse como um espelho. A teoria da reflexão total, portanto, já tinha embasamento científico, porém ainda lhe faltava encontrar materiais com características físicas e refratárias semelhantes ao cobre e ao vidro. Após adaptações e alguns melhoramentos, em 1955, o primeiro protótipo de fibra óptica, com base em vidro¹, estava pronto, sendo patenteado por Kapany.

Nessa época, a principal aplicação da fibra óptica pelo seu criador centrava-se no setor de saúde, especificamente, na transmissão de imagens de alta qualidade. Posteriormente, visando expandir o uso da fibra óptica para outros horizontes, as pesquisas do chinês Charles Kao foram de fundamental importância. Esse pesquisador constatou que a fibra poderia ser utilizada de outras formas, como na transmissão de chamadas telefônicas. As pesquisas de Kao propiciaram o desenvolvimento de uma série de outros estudos com a fibra óptica, realizados por pesquisadores de diversos países, com o objetivo de desvendar outras aplicações para essa tecnologia (CARVALHO, 2015).

¹ É válido salientar que, nessa época, o vidro era utilizado como isolante térmico.

Apesar da grande contribuição de Kao, a tecnologia óptica que se conhece hoje não foi desenvolvida tão rapidamente. Ao longo dos anos, foram necessários diversos estudos e o empenho de muitos pesquisadores, como pode-se observar no Quadro 1, no qual se apresenta a linha de desenvolvimento da tecnologia óptica, conforme Giozza, Conforti e Waldman (1991, p. 9-12).

Tabela 1 - Linha de desenvolvimento da tecnologia óptica.

Data	Pesquisador/Local	Atividade
600 a.C.	Gregos	Sinais de fogo.
1791	Chappe (França)	Invenção do <i>semaphore</i> – sistema de telecomunicação que funciona através de dispositivos mecânicos.
1870	Tyndall (Inglaterra)	Experiência com a transmissão de luz com o uso de um fino jato de água.
1880	Bell (EUA)	Invenção do <i>photophone</i> - transmissão de voz através de feixe de luz.
1910	Hondros e Debye (Alemanha)	Análise de guias de onda dielétricos.
1930	Lamb (Alemanha)	Transmissão de luz em fibras de vidro.
1951	Heel (Holanda) Hopkins e Kapany (Inglaterra)	Invenção do <i>fiberscope</i> – transmissão de imagens através de um feixe de fibras.
1958	Shawlow e Townes (EUA)	Invenção do laser.
1959	Kapany e outros (Inglaterra)	Proposta de fibra óptica com estrutura de núcleo e casca.
1964	Nishizawa e outros (Japão)	Proposta de guia de onda óptico de gás com variação gradual do índice de refração.
1966	Kao e Hockman (Inglaterra) Melchior e Lynch (EUA)	Sugestão de uso de fibras de vidro com núcleo e casca em sistemas de transmissão a longa distância.

1970	Kapron e Keck (EUA)	Fabricação de fibras ópticas com atenuação de 20 db/Km.
1972	Stone (EUA)	Desenvolvimento de fibras ópticas com núcleo líquido.
1975	Payne e Gambling (Inglaterra)	Reconhecimento da janela de dispersão mínima (1300 nm) para fibras ópticas de sílica.
1976	Inglaterra	Primeiro sistema de TV com fibras ópticas.
1977	EUA	Primeiro sistema telefônico com fibra óptica em operação regular.
1983	Japão	Sistema comercial em 1300 nm a 400 Mbps e alcance sem repetidor de até 25 Km.
1987	Iwashita e Matsumoto (Japão)	Sistema coerente experimental a 400 Mbps com 290 Km de alcance.
1988	EUA e Europa	Operação do 1º cabo óptico submarino transatlântico (TAT-8) entre EUA e Europa (França e Inglaterra).
2001	Mundo todo	As fibras ópticas movimentam cerca de 30 bilhões de dólares anuais.
2009	EUA	As fibras atingem praticamente todas as casas.

Fonte: Adaptado de Giozza, Conforti e Waldman (1991, p. 9-12.)

Ao se analisar a tabela acima, percebe-se que a tecnologia das fibras ópticas é relativamente nova se comparada a toda a história da humanidade. Conforme objetivou-se ilustrar, as fibras ópticas foram instrumento de estudo por vários anos e propiciaram resultados positivos em várias áreas e aplicações.

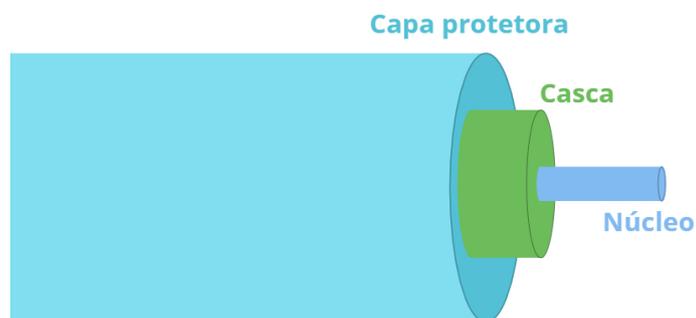
2.2 Fibra óptica

Como visto na seção anterior, o desenvolvimento de tecnologias ópticas teve início em um passado distante e, ao longo do tempo, vários estudos possibilitaram o desenvolvimento de alguns tipos diferentes de fibras ópticas e várias aplicações. Nessa seção, tem-se como intuito fundamentar os principais conceitos envolvidos no funcionamento das fibras.

2.2.1 Componentes das fibras

A fibra óptica é composta basicamente por um cilindro de longa extensão (podendo chegar à escala de quilômetros) micrométrico, ou seja, de espessura menor que um fio de cabelo. Esse cilindro é formado por material dielétrico, transparente, flexível, utilizado como meio físico de transporte para guiar, em sua maioria, ondas de luz. De acordo com Sakamoto (2006), o corpo da fibra óptica mais comumente utilizado pode ser dividido em três elementos básicos: o núcleo (*core*), a casca (*cladding*) e o revestimento (*jacket*). Os três elementos citados estão ilustrados na Figura 2.

Figura 2 - Ilustração do corpo de uma fibra óptica.



Fonte: Helerbrock (2019).

O núcleo da fibra corresponde ao local por meio do qual a luz é guiada. Esse núcleo é feito, geralmente, por vidro ou por um material com características físicas semelhantes (sílica). Esse material deve possuir um índice de refração menor do que o da casca, para que o funcionamento do espelhamento da luz seja efetivo. Além disso, esse material tem a obrigação de ser extremamente puro para que a luz, ao ser transmitida, não interaja com sujeiras, erros de fabricação e demais impurezas, evitando, o máximo

possível, perdas para o ambiente. Quanto às dimensões, o núcleo pode variar de fibra para fibra, mas, em geral, possui um diâmetro de aproximadamente 125 μm . Ademais, tende a ter o formato circular, embora haja outros formatos, como o elíptico ou o semicircular, os quais tem seu uso dependente das necessidades de sua aplicação.

A casca, já citada anteriormente, tem como finalidade agir no sistema de propagação de energia luminosa. Ela cobre o núcleo e, geralmente, é composta por material com um índice de refração maior do que o do material do núcleo. Assim, se o núcleo é formado de sílica, a casca pode ser composta por sílica dopada de flúor e/ou fósforo, além de plástico, em casos mais simples.

Por fim, o revestimento é uma capa de proteção, comumente feita de plástico. Ele constitui uma camada que tem por função proteger a fibra e criar resistência mecânica contra possíveis danos naturais. Dependendo do ambiente de aplicação da fibra, como, por exemplo, em um local vulnerável ao clima ou com fluxo intenso de intempéries, ela pode ser equipada com mais proteções. Na Figura 3, ilustra-se um cabo de fibra óptica que, além do revestimento, conta com uma fibra de fortalecimento e um cabo protetor.

Figura 3 - Ilustração de um cabo de fibra óptica.



Fonte: Montassieur (2004, p. 6).

2.2.2 Princípios de funcionamento das fibras

A luz é transmitida pela fibra. Para que isso seja possível, mobiliza-se conceitos físicos de refração e de reflexão das ondas. A luz é injetada no núcleo de um filamento de fibra óptica, o qual é composto por um determinado material que propicia a propagação da luz. A capacidade de propagação de luz na fibra varia conforme o material por meio do qual é feita. Esse material interfere na velocidade dessa propagação. Halliday, Resnick e Krane (2004), a fim de especificar que a velocidade da luz varia em cada meio,

propuseram a Equação (1), na qual a velocidade pode ser calculada. Nessa equação, relacionando a velocidade da luz no vácuo e o índice de refração do material, tem-se que:

$$V_m = \frac{c}{N_{mat}} \quad (1)$$

V_m = velocidade no material

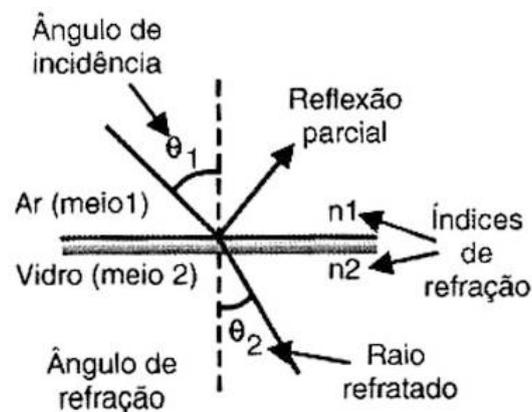
C = velocidade da luz

N_{mat} = índice de refração do material

Logo, a velocidade da luz é diferente em cada meio, seja ele no vácuo, no ar, na água ou no vidro. Halliday, Resnick e Krane (2004) também explicam que a luz, ao mudar de meio, sofre um fenômeno chamado efeito de refração. A refração ocorre quando a luz está se propagando e há uma mudança de meio. Nesse contexto, ela sofre, então, uma mudança de velocidade, não necessariamente havendo desvio, pois o desvio só acontece quando o ângulo de incidência da luz não é perpendicular.

Além do fenômeno da refração, tem-se também o fenômeno da reflexão das ondas. Esse é inevitável nesse processo, podendo ocorrer de modo parcial ou total. A fibra se baseia na reflexão total, que ocorre quando a luz está em propagação. Entretanto, quando essa luz chega em um ponto de divisão de dois meios de transmissão, no sentido do maior para o menor índice de refração, ela é toda refletida na direção oposta, de acordo com o ângulo de incidência, obtendo-se, nesse caso, reflexão parcial, como pode-se observar na Figura 4.

Figura 4 - Demonstração de reflexão parcial.



Fonte: Teixeira (2019, p. 1).

A relação entre a velocidade de propagação da luz e o ângulo de incidência é dada pela Equação 2, também conhecida como equação de Snell-Decartes. Nessa equação, pode ser adicionada uma relação entre os índices de refração dos meios que são inversamente proporcionais à velocidade.

$$\frac{\text{Sen } \theta_1}{\text{Sen } \theta_2} = \frac{V_1}{V_2} = \frac{N_2}{N_1} \quad (2)$$

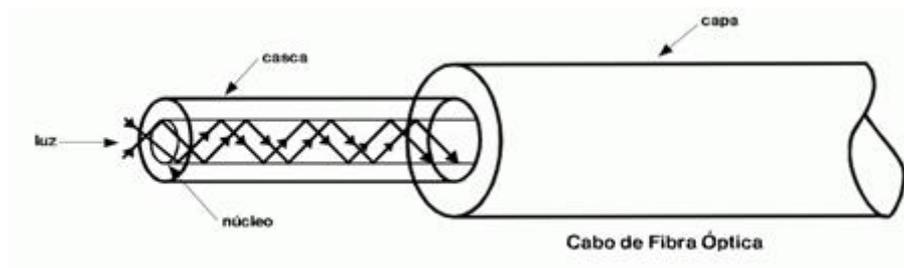
A luz pode ser totalmente refletida se e somente se o ângulo de incidência na divisão dos meios for maior que um dado ângulo limite. Com esse ângulo de incidência, a refração fica nula e a reflexão é total. Logo, é possível deduzir o ângulo limite para a ocorrência de reflexão total através da Equação 3. Ressalta-se, antes, que, para haver a reflexão total, o índice de refração do meio de origem da luz tem que ser maior que o índice de refração do meio de destino.

$$\text{Sen } L = \frac{N_{\text{destino}}}{N_{\text{origem}}} \quad (3)$$

Como diz Del Soto e Corbelle (1994), com a inserção de um sinal óptico no núcleo da fibra, a luz é transmitida em um meio de alto índice de refração (núcleo), sendo assim, ao se propagar, ela pode incidir nas bordas de limitação do meio. Essas bordas estão cobertas por um material de índice de refração menor (casca) e, como já explicado, essa diferença no índice proporciona a reflexão interna total, desviando a luz que continua seu caminho de acordo com a velocidade a qual está submetida em relação ao meio (obedecendo a Equação 2).

A luz inserida em uma ponta da fibra vai se propagando no meio até o seu destino final. Na maioria dos casos, um conversor óptico decodifica e encaminha para seu receptor tratar os dados transmitidos de acordo com a necessidade do processo ou da aplicação, podendo ser um pacote de dados de uma imagem ou texto. A Figura 5 ilustra a propagação da luz no núcleo de uma fibra, com os raios de luz sendo refletidos totalmente sem haver a fuga para o ambiente externo.

Figura 5 - Exemplo de propagação da luz na fibra.



Fonte: Silva (2018, p. 6).

O nível de sinal de transmissão dos raios luminosos é dividido em uma frequência espectral. Essa frequência é mais comumente lida como comprimento de onda (λ), devido à relação entre a velocidade e a frequência do meio de propagação, vide Equação 4, em que

v = velocidade

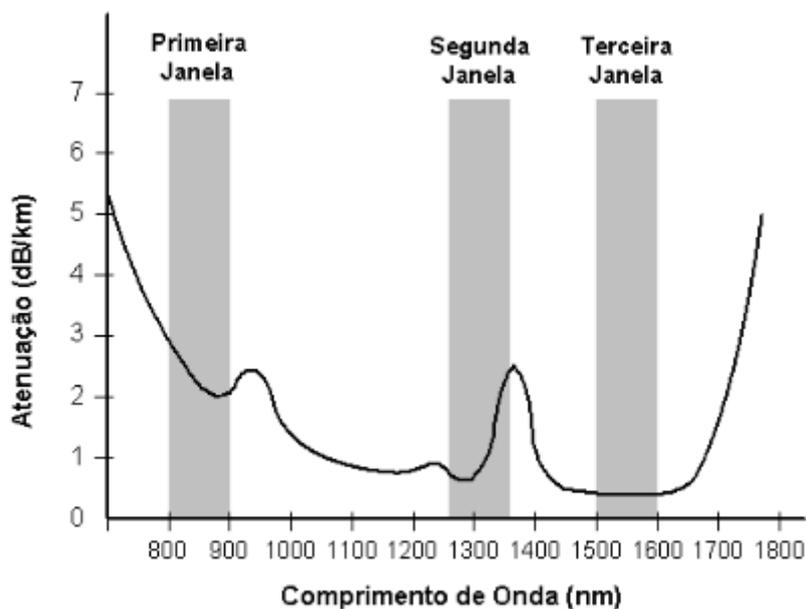
λ = comprimento de onda

f = frequência do meio de propagação

$$v = \lambda \cdot f \quad (4)$$

As fibras ópticas são produzidas com o intuito de trabalharem numa faixa de comprimento de onda entre 850 e 1550 nm. Analisando a figura 6 em seguida pode-se perceber essa limitação de janela para trabalhar em menores atenuações, interessante também salientar é que essa mesma faixa é onde atua a radiação infravermelha que nesse caso justifica o porque a luz é invisível a olho nu.

Figura 6 - Gráfico - atenuação x comprimento de onda - janelas ópticas.



Fonte: Del Soto e Corbelle (1994).

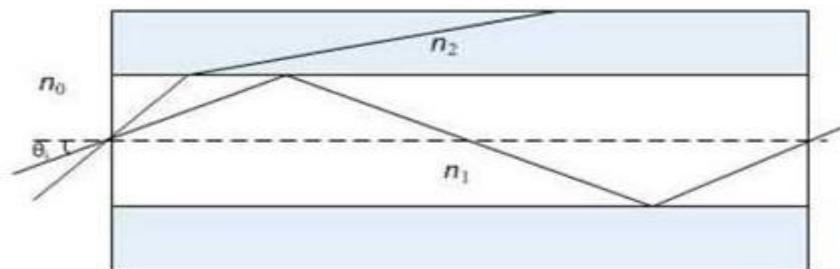
Pode-se observar, na Figura 6, que a região de sinal utilizada está nos pontos em que a atenuação é menor, possibilitando um tráfego de informações homogêneo. Essas regiões, na quais a luz viaja de maneira mais fácil, são chamadas de janelas ópticas.

Salienta-se, ainda, que é possível transmitir mais de uma informação na mesma fibra através do comprimento de onda. Cada informação trafega em um comprimento de onda diferente, para que não haja interferência entre os sinais, evitando que os dados sejam corrompidos.

2.3 Tipos de Fibra

Para que ocorra a condução da luz na fibra, o raio de luz deve incidir com ângulo igual ou inferior a um certo valor. O ângulo tem de ser menor que o ângulo limite. Se essa condição estabelecida, por algum motivo, não ocorrer, há refração e parte do sinal de luz da fibra é perdido, isso gera atrasos na transmissão, podendo até, a depender do tipo e da quantidade de perda, corromper os dados trafegados. Esse fenômeno é conhecido como dispersão modal, visto que a forma como os raios incidem na fibra é denominada pela literatura como “modo”. Na Figura 7 é ilustrado como a dispersão pode ocorrer em uma fibra óptica com a perda de alguns dos raios refratados no núcleo.

Figura 7 - Exemplo de dispersão: um raio refrata e vai para o meio 2 e o outro reflete e continua no núcleo.



Fonte: Del Soto e Corbelle (1994).

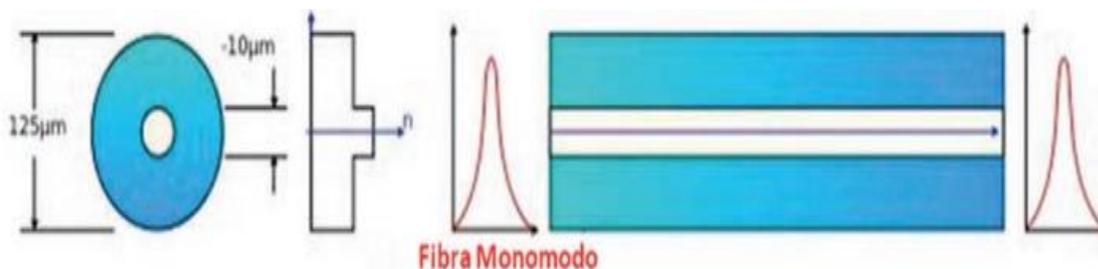
Segundo Keiser (2014), conforme citado por Carvalho (2015, p. 19), “cada modo é um padrão de campos elétricos e magnéticos, que se repete ao longo da fibra em intervalos iguais”. Sendo assim, a depender de como esses modos são propagados, a fibra é classificada. Se há apenas um modo de propagação, elas são chamadas “”; Se possuem mais de um, são chamadas “Multimodo”.

As fibras Monomodo possuem apenas um modo de propagação de luz e não possuem dispersão modal. Segundo as pesquisas de Giozza, Conforti e Waldman (1991) e de Carvalho (2015), as fibras possuem uma alta taxa de transmissão de dados e dimensões menores do que as Multimodo. Elas trabalham numa faixa de comprimento de onda, de 1330 nm até 1550 nm, e apresentam as menores dimensões de núcleo possíveis, em torno de 5 a 17 μm de diâmetro, ficando próximas ao próprio comprimento de onda que pode ser transmitido.

Por possuírem esse núcleo com dimensões tão reduzidas, apresentam um único modo de propagação. Isso significa que os raios de luz possuem apenas um caminho para seguir, trafegando em linha reta, justificando não possuírem a dispersão modal associada às fibras Multimodo. Nessa medida, o ângulo de incidência dos raios nessa fibra é muito pequeno, quase coincidindo com o eixo horizontal.

As maiores vantagens das fibras estão em não sofrerem dessa dispersão, podendo, assim, serem usadas em longas distâncias, na casa dos 400 Km, e possuírem uma capacidade de transmissão maior, com uma largura de faixa superior e menor atenuação, as quais podem ser ainda melhoradas com técnicas de modulação, como WDM (*Wavelength Division Multiplexing*). Porém, por terem esse menor tamanho, essas fibras exigem a utilização de técnicas e de dispositivos mais complexos e precisos, conseqüentemente, mais caros, se comparados aos utilizados nas fibras Multimodo.

Figura 8 - Exemplo de propagação de uma fibra .



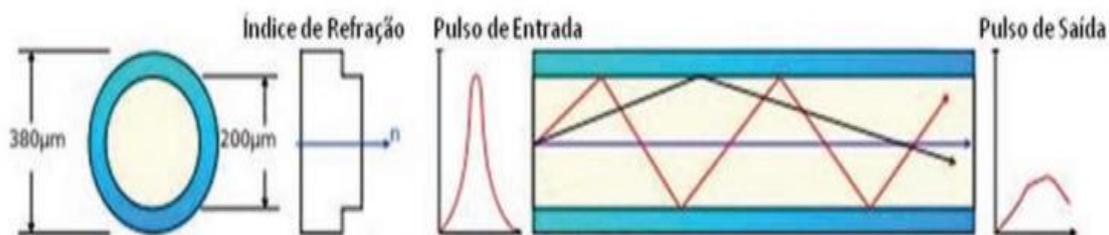
Fonte 1: Carvalho (2015,p. 23).

Por sua vez, as fibras Multimodo possuem um núcleo largo e podem guiar a luz de diversos modos, tornando esse tipo muito sensível à dispersão modal. Essa sensibilidade constitui uma das desvantagens do uso dessas fibras em detrimento das fibras , pois delimita seu funcionamento ideal apenas para curtas distâncias (no máximo 2 Km).

De acordo com Del Soto e Corbelle (1994) e Keiser (2014), as fibras Multimodo podem ser classificadas segundo a fabricação de seu núcleo, sendo subdivididas em: (i) índice de refração degrau, e (ii) índice de refração gradual.

A fibra óptica Multimodo de índice degrau, de acordo com Giozza, Conforti e Waldman (1991), é a que apresenta a maior largura de núcleo, com dimensões que variam em média de 100 a 200 μm , operando com comprimentos de onda entre 850 nm e 1310 nm. A principal característica dessa fibra Multimodo é a total diferença entre o índice de refração do próprio núcleo e o índice de refração da casca. Essa diferença ocasiona, na transmissão do sinal, uma reflexão total. Isso significa que, ao chocar com as paredes da casca, essa reflexão acontece na forma de semirretas, em uma espécie de zigue-zague, que continua em todo o trajeto da fibra, conforme ilustrado na Figura 9. Esse esquema de propagação foi pioneiro e é o mais econômico até o momento, porém apresenta problemas como uma maior atenuação e uma largura de faixa menor, o que limita os dados que podem trafegar.

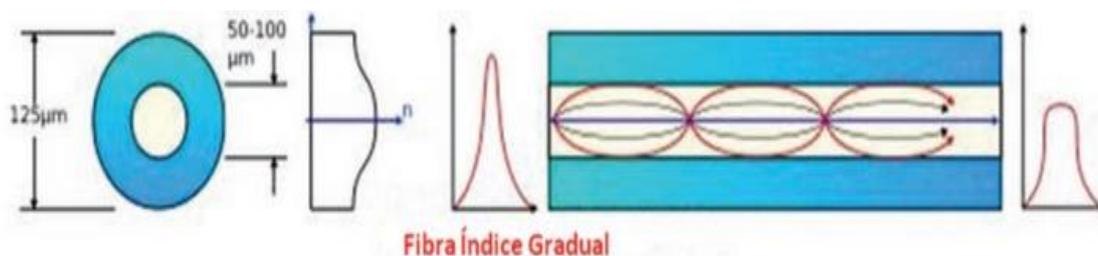
Figura 9 – Exemplo de propagação de uma fibra Multimodo de índice degrau.



Fonte: Carvalho (2015, p. 23).

A fibra Multimodo de índice gradual, por seu turno, conforme Giozza, Conforti e Waldman (1991), possui dimensões menores de núcleo, na ordem de 50 a 85 μm , e um processo de fabricação um pouco mais elaborado do que o do tipo anterior. Como o próprio nome já diz, o índice de refração desse tipo é gradual, ou seja, durante seu comprimento, há uma variação do índice com o maior e o menor valor no núcleo, no limite de separação entre a casca. Por não possuir uma diferença abrupta de nível de refração, a onda de luz viaja mais suavemente, evitando impactos quando chega à fronteira do núcleo. Sendo assim, a propagação nessa fibra não se baseia em zigue-zague, como ocorre no tipo de fibra de índice degrau, mas em ondas que fazem uma viagem helicoidal, como demonstrado na Figura 10. Nesse modo de propagação, as ondas viajam em uma velocidade maior, o que reduz em grande parte as possíveis dispersões modais e acompanha uma maior largura de faixa.

Figura 10 - Exemplo de propagação de uma fibra Multimodo de índice gradual.



Fonte: Carvalho (2015, p. 23).

2.4 Vantagens e Desvantagens gerais no uso das fibras ópticas

Nas seções anteriores, apresentou-se as fibras ópticas, o histórico de seu surgimento, seu funcionamento, os tipos existentes e suas características. Nessa seção,

propõem-se, em vista do exposto, explicar sobre as principais vantagens e as principais desvantagens no uso das fibras ópticas.

Conforme salientado, a principal utilização das fibras ópticas na atualidade é como meio de transmissão de sinais. Empregadas com esse propósito, segundo Del Soto e Corbelle (1994) e Keiser (2014), as fibras ópticas se sobressaem consideravelmente em relação aos demais meios físicos, como cabos coaxiais ou pares metálicos. Isso ocorre, de acordo com os autores, porque essa tecnologia possui, como vantagem, ampla largura de faixa, o que permite que seja utilizada em altas frequências, podendo conter muitas bandas e, com isso, transmitir mais informações sem interferências, utilizando comprimentos de ondas separados.

Outra vantagem dos sistemas baseados em fibras ópticas diz respeito à imunidade à interferência elétrica. Por serem constituídas de vidro, plástico ou outros materiais dielétricos, as fibras possuem isolamento elétrica, tanto que raios, descargas elétricas e diafonias não exercem efeitos em sinais que estão sendo transmitidos pelas fibras, conseqüentemente, esses sinais têm uma probabilidade maior de chegarem, sem qualquer erro, ao destino final.

Com relação à imunidade aos ruídos, outra vantagem que se destaca no emprego das fibras ópticas se refere às perdas bem menores a cada Km, se comparadas aos cabos metálicos, por exemplo (DEL SOTO; CORBELLE, 1994).

Outra vantagem que merece destaque se refere ao peso e ao tamanho das fibras, que são reduzidos, o que facilita muito no momento de instalação e de manutenção. Por terem dimensões menores, o uso de fibras ópticas contribui em várias aplicações que demandam espaço, como quando são aplicadas em aviões, que exigem preferencialmente componentes leves, ou quando são aplicadas em dutos de subsolos, que não possuem tanto espaço disponível para passagem de novos cabeamentos.

Outra vantagem a ser destacada refere-se ao baixo custo de produção das fibras ópticas. Os materiais que compõem as fibras (vidro, sílica, plástico) são bem mais baratos do que aqueles empregados em cabos de cobre, por exemplo, além de estarem em abundância no meio ambiente. No início do surgimento dessa tecnologia, os preços eram elevados para a época, porém, com a evolução técnica da produção das fibras, os valores vêm diminuindo cada vez mais.

Outra característica no emprego das fibras que se destaca é a segurança. Ao se falar em segurança, leva-se em consideração os dados emitidos que, pela luz, não podem propagar para fora da fibra. Utilizando essa tecnologia, é fácil saber quando terceiros

estão tentando captar o sinal, pois, quando interferências assim ocorrem, a potência do sinal luminoso diminui, o que faz com que as informações não sejam decodificadas e os usuários saibam que algo não está ocorrendo de maneira correta no sistema. Ademais, em relação à segurança pessoal, as fibras não conduzem eletricidade, como já dito anteriormente, sendo assim, não há a produção de faíscas, logo, são ideais para ambientes classificados com alto índice de explosão, por exemplo. Outrossim, por serem “isolantes”, é possível efetuar manutenções com equipamentos periféricos em pleno estado de funcionamento. Por fim, outra vantagem que também se fundamenta na composição das fibras é a sua alta resistência a variações de temperatura e a agentes químicos. Se a instalação for feita de uma forma correta, a vida útil desse equipamento pode ser bem longínqua (KEISER, 2014).

Embora verifique-se todas essas vantagens no emprego das fibras ópticas, há algumas desvantagens que merecem ser citadas, haja vista prejudicarem e complicarem, dependendo da aplicação, o funcionamento de um sistema. Como desvantagens, de acordo com Giozza, Conforti e Waldman (1991), é possível citar: (i) a fragilidade das fibras que, por suas dimensões mínimas, exigem um cuidado muito grande no manuseio e na manutenção, e (ii) a dificuldade de conexões e de emendas, as quais, também devido às dimensões mínimas, exigem uma mão de obra qualificada e equipamentos mais modernos e de alta precisão. Ademais, embora o fato de não conduzir energia elétrica ser uma vantagem no uso de fibras ópticas, como visto anteriormente, se elas conduzissem eletricidade, seria também uma vantagem, haja vista poderem ajudar na alimentação de algum equipamento de apoio, como repetidores em locais mais remotos. Como não há condução de eletricidade, a desvantagem é que, nesses casos, é necessário o lançamento de cabos paralelos para sanar essa deficiência.

2.5 Sensores à base de fibra óptica

Conforme já assinalado, a maior implementação da tecnologia de fibra óptica vem sendo como meio de transmissão. Entre esses meios de transmissão estão: (i) os aplicados em redes industriais, como *fieldbus*, *modbus*, *ethernet*, entre outros, e (ii) os aplicados em redes particulares, para a utilização de internet de alta velocidade nas casas e em outros setores. Além desse emprego, essa tecnologia também vem sendo utilizada como sensor de monitoramento em diversas áreas, desde a detecção de grandezas físico-químicas até estruturas civis (CARNEIRO; BARBERO, 2014). Sobre isso, de acordo com Silva

(2016), a utilização das fibras ópticas como sensores sempre se mostrou promissora e proveitosa.

Salienta-se, de início, que os sensores à base de fibra óptica possuem certas divisões que os classificam. Essa classificação, de acordo com Leite (2006), pode ser dividida em relação aos mecanismos que interagem com a fibra, destes, para nosso sistema convém adentrarmos mais profundamente nos últimos três tópicos:

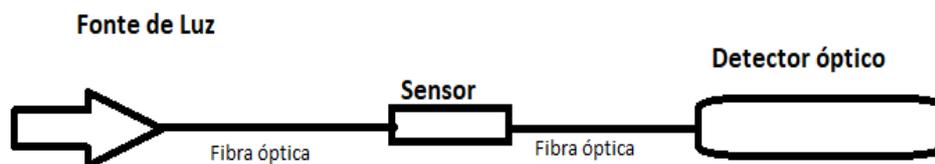
- Grandeza Físico-química: relacionada às variáveis que o sensor pode medir, como temperatura, pressão, deslocamento, pH, dentre outras.
- Transdução: refere-se ao tratamento óptico que cada um tem com a fibra, podendo ser intrínseco ou extrínseco.
- Distribuição: diz respeito ao local no qual ocorre a medição da variável, sendo classificado em pontual, multiponto e distribuído.
- Modulação: refere-se às formas de se fazer a modulação da luz para medir os efeitos das variáveis.

2.5.1 Classificação por transdução

Essa classificação parte do modo como os sensores tratam a fibra. Se a fibra age apenas como um meio de transmissão, ou seja, se a luz é incidida nela e, ao chegar em um elemento sensor, ela é convertida e depois retransmitida, o sensor é considerado extrínseco. Já se o sensor utilizar a própria fibra para medição, ele é considerado intrínseco.

Sobre o primeiro tipo, utiliza-se as vantagens de propagação da luz. Nesse caso, quando a luz chega a um elemento transdutor, ela é convertida, analisada e, então, refletida de volta com o sinal da medição, na mesma fibra ou em uma diferente. Na literatura, os sensores extrínsecos, por possuírem uma parte eletrônica que os compõem, também são conhecidos como sensores híbridos (ELIAS, 2012). Um exemplo de sensor extrínseco é ilustrado na Figura 11.

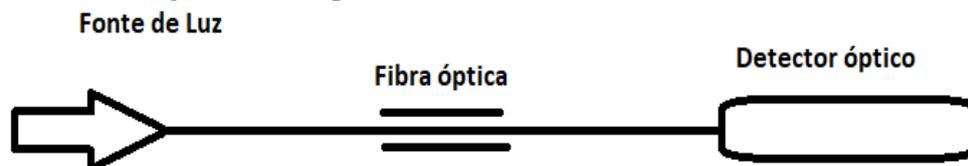
Figura 11 - Esquema de sensor extrínseco.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Já no sensor intrínseco, por seu turno, também conhecido como sensor todo em fibra, é avaliada a alteração que o ambiente proporciona às propriedades inerentes à fibra e, por consequência, modificada a radiação de luz. Dependendo do tipo de variável a se monitorar, é possível cobrir a fibra com um material mais sensível para melhorar a capacidade de medição (SILVA, 2016). Na Figura 12 há um exemplo da utilização do sensor intrínseco.

Figura 12 - Esquema de sensor intrínseco.



Fonte: Elaborada pelo autor.

2.5.2 Classificação por distribuição

Também é muito comum a classificação dos sensores em relação ao local no qual é feita a medição das variáveis ao longo do corpo da fibra, quais sejam: pontual, multiponto e distribuído. No primeiro, como o nome já diz, a medição é realizada em um local único, pontual. Por possuir apenas um lugar específico de ação, por possuir menores dimensões, como demonstrado na Figura 13. Ressalta-se, conforme Silva (2016), um exemplo desse tipo de sensor, a saber: os sensores que utilizam a rede de Bragg pois possuem um tipo de marcação realizada nas estruturas ópticas das fibras, utilizando equipamentos de irradiação ultravioleta.

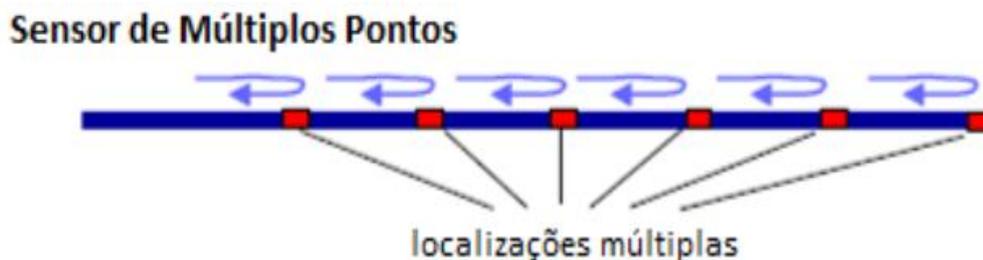
Figura 13 - Exemplo de configuração de sensor pontual.



Fonte: Arantes (2018, p. 11).

O sensor multiponto, por seu turno, pode ser considerado uma subdivisão dos sensores pontuais, pois consistem em uma sequência de sensores pontuais ao longo de uma mesma fibra, como é possível notar na Figura 14. Segundo Carvalho (2014), esse processo de impressão de vários sensores ao longo da fibra é denominado multiplexagem. Uma desvantagem dessa multiplexação é que, se algum sensor apresentar algum problema, o resto da cadeia se torna inútil, sendo mais indicada a utilização de mais fibras para redundância.

Figura 14 - Exemplo de configuração de sensor multiponto.

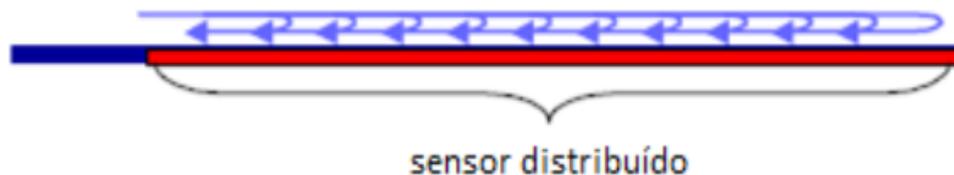


Fonte: Arantes (2018, p. 11).

Por fim, o sensor distribuído, diferentemente dos anteriores, utiliza o corpo da fibra como um todo, obtendo, assim, infinitos pontos de sensoriamento, tanto para medir quanto para transmitir a informação. Na figura 15 percebe-se essas divisões. O sensor distribuído tem por característica atuar, principalmente, com a atenuação e a dispersão ao longo da fibra, além de acusar o rompimento dela (ARANTES, 2018).

Figura 15 - Exemplo de configuração de sensor distribuído.

Sensor Contínuo



Fonte: Arantes (2016, p. 11).

2.5.3 Classificação quanto a modulação

A classificação quanto a modulação é utilizada nos sensores intrínsecos, dado que eles empregam a fibra tanto para transmitir quanto para medir os dados. Essa modulação consiste na alteração de alguma característica da fibra, proporcionada por alguma perturbação externa. São quatro as características que podem ser alteradas, quais sejam: a modulação da intensidade da luz da fibra; a modulação da polarização; a modulação da fase e a modulação por comprimento de onda. Na modulação da intensidade da luz, varia-se a intensidade da luz por dispersões, ao longo do caminho de emissões ou absorções. Essa variação é examinada por meio de analisadores ópticos. Na modulação da polarização, há uma mudança do tensor de polarização do elemento. Na modulação por fase, por sua vez, há um sinal de referência, o qual é utilizado de base, caso haja uma interferência entre o sinal do sensor. Por último, na modulação por comprimento da onda, trabalha-se com as propriedades físicas, como o índice de refração, de reflexão e de absorção, para que haja uma variação (SILVA, 2016).

Como descreve Ribeiro (2009), dentro da modulação, os sensores podem ainda se subdividir em sensores de intensidade e em sensores interferométricos. Os de intensidade são aqueles que vão utilizar de fibras Multimodo, foram os primeiros a serem desenvolvidos e em geral são mais baratos, se comparados com os sensores interferométricos, dado que sua composição são bem mais simples. Os sensores de intensidade utilizam mais as modulações de intensidade de luz e comprimento de onda. Outras de modulações e algumas variáveis que o sensor de intensidade pode trabalhar estão indicadas no quadro a seguir:

Tabela 2 - Modulação e variáveis de um sensor de intensidade.

Sensor de Intensidade	
Possíveis tipos de modulação	Variáveis que podem ser medidas
Perdas por micro curvaturas	<ul style="list-style-type: none"> • Pressão • Deslocamento • Deformação • Fluxo • Interrupção • Força • Temperatura • Vibração • Temperatura distribuída
Interrupção do feixe de luz	
Acoplamento fibra-fibra	
Alteração do revestimento (casca)	
Reflexão	
Absorção	
Atenuação	
Fluorescência	
Variação do comprimento de onda	
Espalhamento molecular	
Efeitos Moleculares	
Campos evanescentes	
Polarização	

Fonte: Adaptado de Ribeiro (2009, p. 5-6.)

O sensor interferométrico, por sua vez, diferentemente do sensor de intensidade, utiliza fibras ópticas. De acordo com Elias (2012), pelas fibras Multimodo sofrerem de dispersão modal, a radiação da luz não se mantém ao longo da fibra, o que ocasiona atrasos, em função do comprimento de onda, por se propagarem em mais de um modo,

essas fibras geram grandes perdas de sinal. Diferentemente desse cenário, os sensores interferométricos, por empregarem fibras Monomodo, produzem uma resolução maior que a dos sensores de intensidade, devido à sua alta sensibilidade. Além disso, têm como vantagens sua geometria flexível e a possibilidade de multiplexação eficiente. Nesse caso, a modulação mais presente é a de fase, porém, no quadro a seguir, pode-se perceber outros meios.

Tabela 3 - - Modulação e variáveis de um sensor interferométrico

Sensor Interferométrico	
Possíveis tipos de modulação	Variáveis que podem ser medidas
Alterações dimensionais da fibra	<ul style="list-style-type: none"> • Pressão • Deslocamento • Deformação • Fluxo • Campo magnético • Força • Temperatura • Vibração • Rotação • Aceleração • Campo elétrico • Corrente e Tensão elétrica • Comprimento de onda • Índice de refração
Variação nas constantes opto <u>elásticas</u>	
Rotação	
Campos magnéticos via alteração das constantes de propagação modais	
Polarização	
Acoplamento modal	
Alteração do caminho óptico	

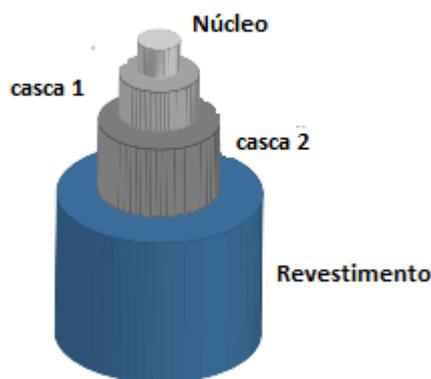
Fonte: Adaptado de Keiser (2014, p. 5-6).

Nessa seção foram expostos os princípios para a criação de sensores a base de fibra óptica, desde suas variáveis até seus funcionamentos básicos quanto ao comportamento da luz. A maioria dos sensores abordados utilizam as fibras mais frequentemente utilizadas como as Multimodo. Para estudo comparativo, detalhamos a seguir as fibras dupla casca (*Dual Clad*).

2.6 Fibra *Dual Clad*

A fibra óptica *Dual Clad* ou *doubly clad*, de acordo com Elias (2012), se diferencia em sua estrutura básica das fibras mais usuais, dado que não possui sua estrutura composta por núcleo, casca e revestimento. Essa fibra, também conhecida como fibra de perfil W, pois o gráfico de incidência em relação ao índice de refração se assemelha à letra W, é composta por núcleo, uma primeira casca, uma segunda casca e, só depois, a camada de revestimento. Como pode-se observar, até pelo nome, esse tipo de fibra possui duas camadas de casca com índices de refração diferentes em cada uma delas. Confira, na Figura 16, a representação da fibra em foco nesta pesquisa.

Figura 16 - Representação do corpo da fibra *Dual Clad*.



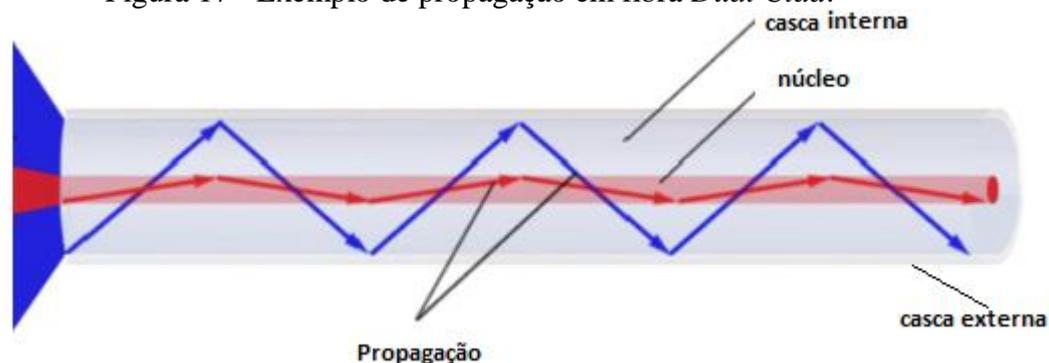
Fonte: Laser componentes (2019).

Por possuir duas camadas de casca, a fibra *Dual Clad* obtém características de propagação um pouco diferentes das usuais. Segundo Elias (2012), elas possuem: o núcleo com um determinado índice de refração; a casca inferior com um índice menor do que o estabelecido no núcleo; e a casca externa com um índice maior do que o da casca interna, porém, ainda menor que o do núcleo. O núcleo, por sua vez, é dopado com elementos de terras raras, como o Érbio (Er), o Neodímio (Nd) e o Itérbio (Yb). Esses elementos possuem íons livres em suas últimas camadas de valência, os quais proporcionam maior facilidade na absorção da luz.

Esse esquema com diferenças nos índices de refração é utilizado para que haja uma dupla propagação na fibra. Essa dupla incidência possibilita aumento no nível do sinal. Esse tipo de fibra é muito utilizado em sistemas de amplificadores a laser e de

frequência. Nesses casos, a título de exemplificação, um sinal é injetado no núcleo da fibra e outro sinal é injetado, por meio desses dispositivos amplificadores, no espaço formado entre as duas cascas. No decorrer da propagação, a luz transmitida entre as duas cascas vai sendo absorvida pelo núcleo, amplificando o sinal e evitando perdas. Esse tipo de propagação está ilustrado na Figura 17.

Figura 17 - Exemplo de propagação em fibra *Dual Clad*.



Fonte: Adaptado de Ponsoda (2013, p. 6).

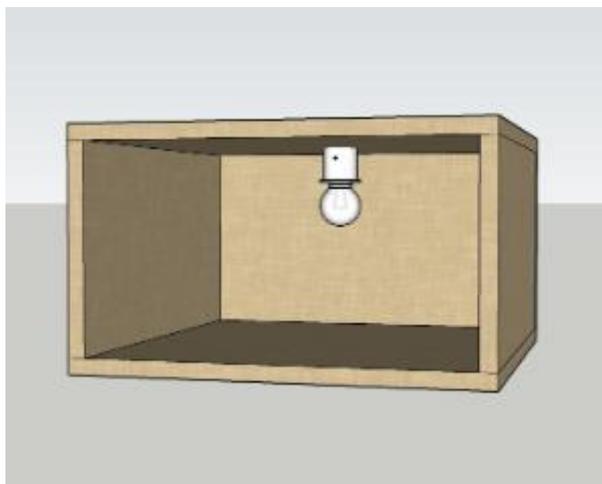
Além da vantagem de aplicação dessas fibras em transmissões com amplificadores a longa distância, elas podem ser usadas para a compensação da dispersão cromática, em comunicações ópticas e outras aplicações, além de possuírem baixas perdas em relação às curvaturas. É relevante mencionar que “curvaturas apropriadas podem proporcionar aumento das perdas em comprimentos de onda maiores” (ELIAS, 2012, p. 69). Além disso, uma característica proveniente desse tipo de fibra é que ela consegue atuar como um filtro de comprimento de onda, tendo um comprimento específico de trabalho de aproximadamente 1550 nm, ceifando as frequências maiores e menores, de acordo com a curvatura implementada.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

A fibra utilizada nos experimentos foi a Monomodo 5/125 μm da marca *Furukawa*. Essa fibra apresenta excelentes qualidades de propagação, sendo 5 μm o diâmetro do núcleo e 125 μm o diâmetro da casca. As características de propagação se assemelham as da fibra dupla casca.

Com isso em mente foi preparado para gerar o distúrbio na nossa variável de controle, no caso, a temperatura uma caixa de madeira servindo como uma espécie de estufa com três lâmpadas incandescentes de 100w/127v. Dessa forma controlando a potência da luminosidade da lâmpada e aproveitando o fato que a mesma gera uma quantidade de calor considerável podemos utilizar como elemento atuador de nosso sistema. A Estufa ilustrada na figura 18, foi utilizada no caso para evitar perdas que configurem distúrbios no sistema foi executado na parte interna a instalação de uma camada de poliestireno expandido (isopor) para que a temperatura se mantivesse estável e os experimentos possam ser realizados de uma melhor maneira.

Figura 18 - Exemplo de estufa utilizada no experimento



Fonte : Raoni (2023)

De posse do corpo de análise (Fibra óptica) e de um local controlado para que possamos estabelecer as mudanças da temperatura (estufa), foi necessário de um método para que possamos estar executando as medições, tanto da variação da intensidade da luz através da fibra óptica, quanto da temperatura em si dentro do local onde nossa experiência estaria sendo feita e então posteriormente correlacionar ambas. Em questão da análise da fibra, os dois lados possuem conectores conhecidos como SC (*Standard Connector*), esses conectores são prensados na fábrica e possibilitam um encaixe

adequado da fibra com perdas mínimas em seus respectivos receptores e transmissores, afinal a fibra tem por função principal um meio de transmissão sendo necessário outras peças para servir de interface. Com o auxílio desses conectores, de um lado definido como transmissor, utilizamos uma caneta óptica geradora de luz para testes em fibra. Essa caneta funciona com o princípio de emitir um feixe de luz em um certo comprimento e potência de onda, em que no lado oposto se localiza o receptor conectado à um equipamento para fazer a medição desse feixe de luz chamado *powermeter*, os instrumentos utilizados para medição ópticas são mostrados na figura 19.

Figura 19 - *Powermeter* e caneta óptica utilizadas



Fonte: Autoria Própria (2023)

A caneta de luz utilizada possui uma potência de saída de 10mw e pode chegar até a distâncias de 10 km. O *powermeter* realiza a medição da intensidade desse sinal inserido na ponta oposta da fibra óptica, com esses dados coletados podemos estar analisando se com a ação da temperatura no corpo da fibra houve, ou não, variação na intensidade de sinal de acordo com a temperatura medida na estufa. O *powermeter* também tem diversas funções no âmbito das telecomunicações, mas para esse experimento fica a cargo de nos indicar os valores de acordo com a ação do distúrbio.

Como a estufa utilizada pode ser considerada caseira pois aproveita a estrutura de outro projeto já apresentado em trabalhos passados, a faixa de análise da temperatura não é tão grande, partindo da temperatura ambiente e sendo utilizada de acordo com o calor gerado pelas lâmpadas dentro do recipiente. Foi realizado um controle de temperatura com um elemento sensor PT100 exemplificado na imagem a seguir, inserido dentro da estufa, trabalhando em conjunto com um circuito integrado específico para medições de temperatura LM35. Como fala Grundfos (2023), o PT100 possui uma haste de platina que é um metal extremamente sensível a mudança de temperatura e com isso ele correlaciona essa mudança de temperatura com a resistência desse metal. Na temperatura de 0°C a resistência medida é de 100Ω , por isso o nome, à medida que a temperatura aumenta a resistência do material aumenta também.

Figura 20 - Sensor de temperatura PT100



Fonte: Autoria Própria.

O LM35 visto em Santana (2023), é um circuito integrado especificamente possui uma tensão de saída que é linearmente proporcional à temperatura em graus celsius e funciona entre -55°C a $+150^{\circ}\text{C}$. Além da medição de temperatura também é possível a medição da umidade, não é a variável principal, mas também podemos trabalhar em cima dela já que está intrinsicamente conectada. Ele é linear como dito anteriormente e a cada 10mV na sua saída corresponde a um grau da temperatura do local em que o componente está conectado, nesse caso a um controlador Esp32.

Utilizando essa junção do sensor de temperatura PT100 conectado do circuito integrado LM35 conseguimos realizar a medição da temperatura dentro da estufa onde a fibra estava inserida. Realizando essa medição ele retorna para o Esp32 que realiza o

controle de acordo com o *setpoint* desejado no momento. Aproveitando a utilização do controlador Esp32 e para facilitar a experiência junto da lógica do controlador foi implantada uma interface junto ao celular vide figura 21, evitando qualquer modificação do programa base que possa ocorrer acidentalmente durante os testes. Nesse sistema conseguimos balancear nossa temperatura do ambiente criado regulando a intensidade das lâmpadas incandescentes para a modificação da variável física em questão e assim coletar os dados de alteração da intensidade luminosa com o *powermeter* e assim analisar a relação entre a potência de sinal luminoso dentro da fibra óptica em relação ao aquecimento gradativo ocorrido no local e com posse dos dados confirmar sua aplicabilidade. As experiências foram conduzidas no laboratório de eletrônica do CEFET CAMPUS ARAXÁ com o devido apoio e supervisão dos responsáveis do local.

Figura 21 - Tela de interface do programa pelo celular



Fonte: Autoria Própria

3.1 Tomada de dados

Inicialmente foi realizado a medição da temperatura ambiente e a mesma foi constatada no valor de 25°C, é necessária essa medição para servir de ponto inicial de nosso experimento. Com o set point inicial já estabelecido para o ponto de partida foi realizado a inserção da fibra óptica dentro do ambiente a ser alterado e feito o

enclausuramento deixando as duas extremidades da fibra óptica para fora. Numa das extremidades conectamos o receptor e noutra o transmissor. É necessária uma atenção especial nos orifícios de saída das pontas para evitar interferência do ambiente externo e acabar interferindo na medição da temperatura interna da caixa.

No *powermeter* ilustrado na Figura 22, podemos definir qual comprimento de onda analisar. Primeiramente foi utilizado o comprimento mais usual de 1310 nm, dessa forma foi realizado o acionamento da caneta para que pudéssemos coletar a primeira medição de intensidade da luz em temperatura ambiente.

Figura 22 - Medição de intensidade de luz realizada



Fonte: Autoria Própria

Utilizando o aplicativo de celular vinculado ao controlador, o planejamento foi de colocar um *setpoint* aumentando de grau em grau a temperatura interna da estufa montada. Um tópico que foi preciso levar em consideração foi a variável proposta no trabalho, a temperatura é uma das variáveis mais comuns de se exercer o controle nos processos atuais e uma das mais importantes, dito isso, uma característica que sempre a acompanha é a questão do tempo. A temperatura é uma variável lenta, a proposta inicial ao incrementar um grau dentro do recipiente leva um certo tempo e, ao chegar na temperatura desejada ainda esperamos cerca de um minuto para que a mesma se

estabilizasse e se estabilizasse para que só então coletássemos a alteração da intensidade da luz na fibra evitando falsos resultados.

Esse processo de aumento de temperatura e coleta de variação de intensidade luminosa se sucedeu repetidas vezes até a potência das lâmpadas estivesse em seu máximo assim chegando também ao máximo de temperatura de trabalho no experimento, no caso essa temperatura ficou definida em 50°C, gerando então um total de 25 medições. A cada *setpoint* de temperatura definido e colocado no sistema de controle, foi anotado a temperatura e averiguado o valor da intensidade luminosa indicada no *powermeter*, ao fim dessas 25 medições aguardamos a temperatura do recipiente da experiência se equivaler com a temperatura do ambiente externo e logo então realizamos novamente as medições para conferência. Logo após o procedimento feito novamente para conferência foi realizado a alteração do comprimento de onda no *powermeter* dessa vez para 840nm e realizado novamente os mesmos procedimentos para que possamos posteriormente analisar os dados e chegar as conclusões cabíveis.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Com a execução das experiências no laboratório utilizando os métodos citados na sessão anterior foi coletado duas medições. Uma utilizando um comprimento de onda inicial de 1310nm e outra com comprimento de onda de 840 nm.

Tabela 4 - Análise de dados com comprimento de onda de 1310nm

Análise de dados com comprimento de onda de 1310nm		
Potência do sinal (dB)	Temperatura (°C)	Umidade (g/cm ³)
66,9	25	65
67,01	26	65
67,36	27	64
67,07	28	62
66,95	29	59
67,18	30	55
67,29	31	52
67,08	32	50
67,01	33	47
66,88	34	45
66,84	35	42
67,04	36	39
66,84	37	36
67,15	38	34
67	39	30
67,11	40	26
66,99	41	23
66,99	42	20
67,07	43	18
67	44	15
67,2	45	13
66,7	46	11
66,9	47	10
67,25	48	8
66,56	49	7
66,5	50	7

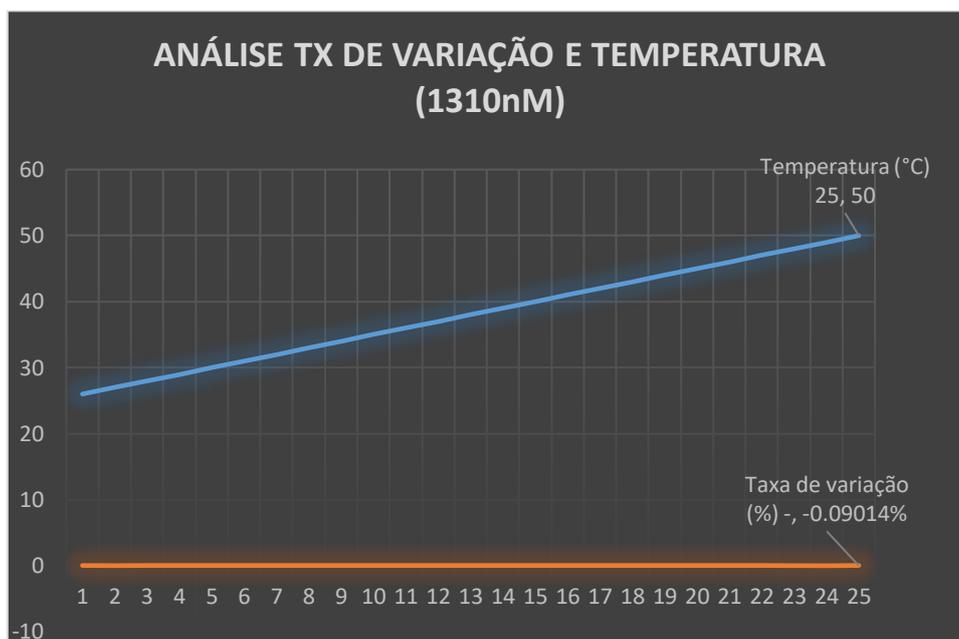
Com os dados coletados da ação da temperatura na faixa entre 25 e 50°C, na fibra óptica 5/125, houveram essas alterações de potência do sinal luminoso. A menor potência obtida foi de 66,5dB com uma temperatura de 50°C, e a maior potência de 67,29 dB com a temperatura de 31°C. Com esses dados também podemos analisar a questão da taxa de variação da potência de sinal em relação a cada grau de temperatura:

Tabela 5 - Taxa de variação de temperatura com comprimento de onda de 1310nm

Análise de dados com comprimento de onda de 1310nm		
Potência do sinal (dB)	Temperatura (°C)	Taxa de variação (%)
66,9	25	-
67,01	26	0,16442%
67,36	27	0,52231%
67,07	28	-0,43052%
66,95	29	-0,17892%
67,18	30	0,34354%
67,29	31	0,16374%
67,08	32	-0,31208%
67,01	33	-0,10435%
66,88	34	-0,19400%
66,84	35	-0,05981%
67,04	36	0,29922%
66,84	37	-0,29833%
67,15	38	0,46379%
67	39	-0,22338%
67,11	40	0,16418%
66,99	41	-0,17881%
66,99	42	0,00000%
67,07	43	0,11942%
67	44	-0,10437%
67,2	45	0,29851%
66,7	46	-0,74405%
66,9	47	0,29985%
67,25	48	0,52317%
66,56	49	-1,02602%
66,5	50	-0,09014%

Analisando a variação de sinal luminoso se percebe que nesse trecho não há uma interferência satisfatória para que possamos trabalhar com uma boa resolução e tentar estabelecer uma medição adequada da variação de temperatura. A taxa de variação não fica acima de 1% na faixa de temperatura estipulada tendo uma alteração muito baixa mesmo utilizando cinco casas decimais de resolução, o gráfico da figura 23 ilustra a demonstração da constante dos dados, fazendo uma análise é possível constatar a falta de variação para que possa correlacionar valores e criar uma medida satisfatória.

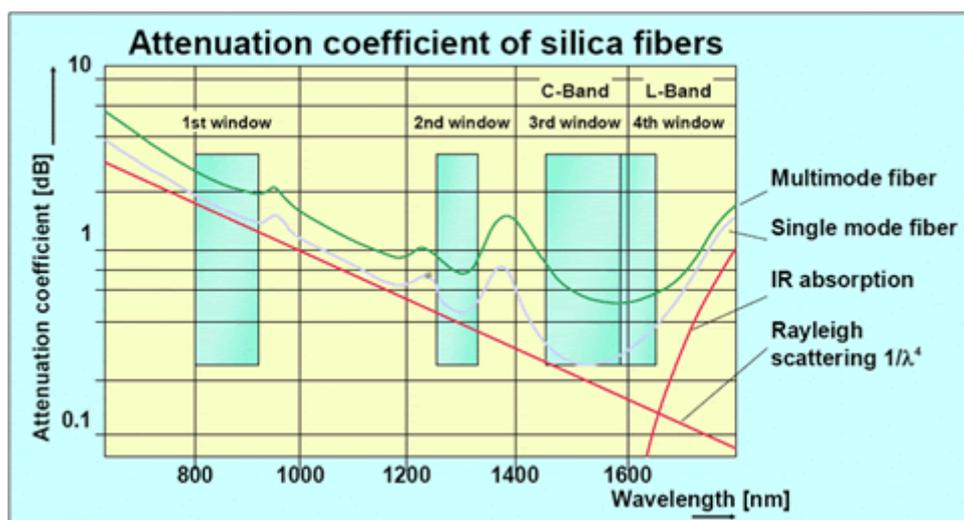
Figura 23 - Gráfico de análise de variação de luz pela temperatura



Fonte - Autoria Própria

Outra experiência feita buscando melhores resultados seria alterando o comprimento de onda inserido no corpo da fibra óptica em questão proposta no estudo. Ao invés de utilizarmos um comprimento de 1310 nm, aplicamos um comprimento menor de 840nm trabalhando na primeira janela de transmissão de dados ópticos conforme mostra a figura 24.

Figura 24 - Gráfico de janelas ópticas utilizadas na experiência



Fonte - Sistemas DWDM: Introdução. (2023)

Como citado nas seções teóricas anteriores reduzindo o comprimento de onda podemos ter alteração nas suas atenuações e conseqüentemente no ganho do mesmo, reduzir o comprimento de onda teve como objetivo experimentar a influência que poderia ter dessa alteração com a atuação da temperatura. Executando o mesmo procedimento de testes, a única alteração foi um pequeno ganho no sinal, mas a variação continuou parecida não gerando modificações consideráveis se formos pegar em consideração a primeira experiência. Com Valor máximo de ganho de 70,3dB e mínimo de 69,15dB mantendo uma taxa de variação menor que 2% entre as faixas medidas de temperatura propostas pelo experimento.

Tabela 6 - Taxa de variação de temperatura com comprimento de onda de 840nm

Análise de dados com comprimento de onda de 840nm			
Potência do sinal (dB)	Temperatura (°C)	Umidade (g/cm ³)	Taxa de variação (%)
69,15	25	71	-
69,6	26	70	0,65076%
69,9	27	69	0,43103%
69,7	28	64	-0,28612%
69,7	29	61	0,00000%
69,5	30	58	-0,28694%
69,6	31	56	0,14388%
70,01	32	54	0,58908%
70,16	33	51	0,21426%
69,95	34	48	-0,29932%
70	35	46	0,07148%
69,5	36	42	-0,71429%
69,7	37	39	0,28777%
69,5	38	39	-0,28694%
69,9	39	36	0,57554%
69,5	40	31	-0,57225%
69,98	41	28	0,69065%
70,2	42	26	0,31438%
70,3	43	23	0,14245%
70,3	44	21	0,00000%
70,3	45	18	0,00000%
70,2	46	16	-0,14225%
70,3	47	14	0,14245%
70,5	48	11	0,28450%
69,77	49	10	-1,03546%
70,2	50	8	0,61631%

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Não podemos negar que a descoberta e aplicação da tecnologia óptica nas últimas décadas tem sido de extrema importância para evolução humana. Talvez a mesma passe despercebida em comparação a outras descobertas de nossa civilização, mas mesmo atuando um tanto quanto oculta e sendo discutida em alguns nichos menores de pesquisas é inegável sua importância. Ela está tanto no roteador que provê internet nas casas de milhões de pessoas ao redor do mundo quanto em complexas comunicações industriais que geram grandes receitas em seus setores.

Possuindo uma tecnologia com muitas possibilidades de uso, este trabalho se fundamentou na tentativa de sua utilização com o intuito de conseguir um método de medição de temperatura alternativo aos já usados nas indústrias hoje em dia, levando em conta as diversas vantagens que a fibra óptica carrega consigo. Já há alguns sensores em voga utilizando desses princípios para medição de outras grandezas físico químicas, porém na literatura há escassez de pesquisas relacionado as especificamente com a temperatura. Como a fibra foi utilizada como o elemento sensor onde a variável atuava nela diretamente como citado nas seções anteriores ela serviu como sensor de transdução intrínseca.

Analisando os dados percebemos que no *range* proposto de acordo com as possibilidades da experiência em bancada (25-50°C), a resolução das mudanças da intensidade da luz sob o efeito da temperatura foi satisfatória ao ponto de criar uma relação entre a perda ou ganho em decibéis em função da temperatura. O material do revestimento da fibra, que protege a fibra nua (núcleo e casca) contra agentes externos, pode ter atenuado a resposta da mesma (fibra nua) para as variações de temperatura. Mesmo com a possível interferência da proteção externa, a alteração no *range* de temperatura deve melhorar os resultados. Em Silva (2016), onde se pode levar em consideração em que sensores intrínsecos já utilizados atualmente, por exemplo na medição de peso, é a modificação da parte casca e da capa protetora da fibra para que ela possa se adaptar ao ambiente em que for realizar medições.

Para trabalhos futuros sugerimos trabalhar sem a proteção externa, fazendo uma análise comparativa com os resultados aqui obtidos. As possibilidades de aplicação em ambiente ou processos industriais que requerem monitoramento contínuo de temperatura como: reações químicas, fornos industriais, processos alimentícios, entre outros. O Aproveitamento da transmissão rápida do sinal na resolução de problemas de produção.

A otimização do tempo de resposta e tomada de providências no caso de necessidade de manutenção. Uma aplicação que já vem sendo implementada é em ambientes onde não podem circular sinais elétricos, por risco de explosão. As refinarias de petróleo estão substituindo sensores pneumáticos por sensores de fibra óptica. Outra aplicação importante é na planta industrial com ruído eletromagnético muito intenso. A fibra óptica é totalmente imune ao ruído eletromagnético. Aproveitando a vantagem da velocidade de transmissão, o monitoramento e alarmes relacionados a segurança no trabalho, segurança pessoal entre outros, seria de extrema importância e eficácia a utilização de sensores a base de fibra óptica.

REFERÊNCIAS

ARANTES, Luiza Mercadante. **Projeto de sensor de fibra óptica de pressão e temperatura para poços de petróleo**. Orientador: Ilson Paranhos Pasqualino. 2018. 74 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia de Petróleo) – Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2018.

BEGA, Egídio Alberto *et al.* (org.). **Instrumentação Industrial**. 2. ed. Rio de Janeiro: Interciência, Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás, 2006. 583 p.

CARNEIRO, Alexander Cascardo; BARBERO, Andrés Pablo López. Princípio de funcionamento dos sensores ópticos baseados em grades em fibras ópticas e sua importância nas diferentes áreas tecnológicas. **Engevista**, Niterói-RJ, v. 16, n. 4, p. 389-403, 2014. Disponível em: <https://periodicos.uff.br/engevista/article/view/8986>. Acesso em: 8 nov. 2019.

CARVALHO, Priscila. **Aplicação da fibra óptica em sistemas FTTX**. Orientador: José Feliciano Adami. 2015. 83 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Elétrica) - Curso de Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2015.

DEL SOTO, Mariano Sánchez; CORBELLE SÁNCHEZ, José Antonio. **Transmissão Digital e Fibras Ópticas**. São Paulo: Makron Books, 1994. 310 p.

ELIAS, Mauro Biscaro. **Sistemas de sensores ópticos baseados em fibra óptica de perfil-W dopada com Érbio**. Orientador: Carlos Kenichi Suzuki. 2012. 196 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) -Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade de Campinas, Campinas, 2012.

Getting the whole picture: bundled glass fibers. **Corning Museum of Glass**. Corning-NY, 20 out. 2011. Disponível em: <https://www.cmog.org/article/getting-whole-picture-bundled-glass-fibers>. Acesso em: 8 nov. 2019.

GIOZZA, William Ferreira; CONFORTI, Evandro; WALDMAN, Hélio. **Fibras ópticas: tecnologia e projeto de sistemas**. São Paulo: Makron Books, 1991.

GTA/UFRJ – Grupo de Teleinformática e Automação da Universidade Federal do Rio de Janeiro. **DWDM**. Disponível em: https://www.gta.ufrj.br/grad/04_1/wdm/dwdm.html. Acesso em: 15 nov. 2019. il. color.

GRUNDFOS. **Sensor PT100**. São Bernardo dos Campos – SP, 15 nov. 2015. Disponível em: <https://www.grundfos.com/br/learn/research-and-insights/pt-100-sensor#:~:text=Um%20sensor%20Pt%20100%20%C3%A9,da%20C3%AD%20o%20nome%20Pt%20100>. Acesso em: 10 set. 2023.

HALLIDAY, David; RESNICK, Robert; KRANE, Kenneth. **Física 4**. 5. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2004. v. 4..

HELERBROCK, Rafael. Fibra óptica. **Brasil Escola**. Disponível em: <https://brasilescola.uol.com.br/fisica/fibra-optica.htm>. Acesso em: 8 nov. 2019. il. color.

História da Fibra Óptica. **Oficina da NET**. Belo Horizonte. Disponível em: <http://inforrede.com.br/historia-da-fibra-optica/>. Acesso em: 8 nov. 2019.

KEISER, Gerd. **Comunicações por fibras ópticas**. 4. Ed. Porto Alegre: AMGH, 2014.

Laser componentes. **Catálogo molex fibras ópticas**. França, 2019.

LEITE, Rogério Lara. **Uma contribuição ao estudo e desenvolvimento de sensores de alta tensão baseados em fibras ópticas**. Orientador: José Antônio Siqueira Dias. 2006. 124 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Faculdade de Engenharia Elétrica e Computação, Universidade de Campinas, Campinas, 2006.

MEYER, Maximiliano. Como foi inventada e como funciona a fibra ótica. **Oficina da NET**. Belo Horizonte, 11 mar. 2015. Disponível em: [http https://www.oficinadanet.com.br/post/14222-como-foi-inventada-a-fibra-otica](http://https://www.oficinadanet.com.br/post/14222-como-foi-inventada-a-fibra-otica). Acesso em: 8 set. 2019.

MONTASSIEUR, Alexandre. Fibra ótica. **Enciclopédia Maxwell**, 4 set. 2004. Disponível em: <https://enciclopediamaxwell.wordpress.com/2014/09/04/fibra-otica/>. Acesso em: 8 nov. 2019.

PONSODA, Joan J. Montiel i. **Analysis of photodarkening effects in ytterbium-doped laser fibers**. 2013. 100 f. Tese (Doutorado em Ciência) - School de Electrical Engineering, Aalto University School, Espoo, Finland, 2013.

RIBEIRO, José Antônio Justino. **Comunicações Ópticas**. 4. Ed. Erica: São Paulo:2009. 456p.

RODRIGUES, Fabio Diniz Moraes. **Transmissão por fibra óptica: a evolução nos sistemas de comunicação**. 2018. 21 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Elétrica) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Norte Paraná, Ponta Grossa, 2018.

SAKAMOTO, João Marcos Salvi. **Sensor em fibra óptica aplicado à caracterização de atuadores piezoelétricos flexensionais**. Orientador: Cláudio Kitano. 2006. 154 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Faculdade de Engenharia Elétrica, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2006.

Sistemas DWDM: Introdução. **Teleco: Inteligência e comunicação**. São Paulo-SP, 20 ago. 2019. Disponível em: https://www.teleco.com.br/tutoriais/tutoriaisdwdm/pagina_1.asp#:~:text=As%20fibras%20%20C3%B3pticas%20n%C3%A3o%20transmitem,conhecidos%20como%20janelas%20de%20transmiss%C3%A3o. Acesso em: 20 ago. 2023.

SILVA, Marianne Stely Peixoto e. **Sensor distribuído de temperatura à fibra óptica baseado em espalhamento Raman**. Orientador: Joaquim Ferreira Martins Filho. 2018. 84 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2018.

SILVA, Ricardo Augusto Rodrigues e. **Aplicação inovadora de sensores de fibra ótica em solos para avaliação de parâmetros de rigidez a muito pequenas deformações.** Orientadora: Cristiana Maria da Fonseca Ferreira. 2016. 134 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto, 2016.

SILVA JÚNIOR, Valdemir Manoel da. **Sensor de temperatura à fibra óptica de perfil D.** Orientador: Joaquim Ferreira Martins Filho. 2016. 86 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Pós-graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2016.

TEIXEIRA, Mariane Mendes. Reflexão total da luz. **Mundo Educação.** Disponível em: <https://mundoeducacao.bol.uol.com.br/fisica/reflexao-total-luz.htm>. Acesso em: 08 nov. 2019.



Emitido em 18/12/2023

CÓPIA DO TRABALHO Nº 231/2023 - DELMAX (11.57.05)

(Nº do Protocolo: NÃO PROTOCOLADO)

(Assinado digitalmente em 18/12/2023 17:30)

SERGIO LUIZ DA SILVA PITHAN
PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO
CEAIX (11.51.16)
Matrícula: ###214#4

(Assinado digitalmente em 18/12/2023 18:41)

Diego Alberto dos Reis Militão
DISCENTE
Matrícula: 2015#####6

Visualize o documento original em <https://sig.cefetmg.br/documentos/> informando seu número: **231**, ano: **2023**, tipo:
CÓPIA DO TRABALHO, data de emissão: **18/12/2023** e o código de verificação: **f329a166a4**