

**Universidade Federal de Santa Catarina  
Centro de Florianópolis  
Departamento de Engenharia  
Elétrica**



**Thomas Rodrigues de Souza**

**SENSORIAMENTO ÓTICO DE CORRENTE EM LINHAS DE  
TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA: ANÁLISE DE  
CALIBRAÇÃO E SENSIBILIDADE**

**Florianópolis  
2022**



**Thomas Rodrigues de Souza**

**SENSORIAMENTO ÓTICO DE CORRENTE EM LINHAS  
DE TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA: ANÁLISE  
DE CALIBRAÇÃO E SENSIBILIDADE**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Universidade Federal de Santa Catarina como parte dos requisitos necessários para a obtenção do Grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Mauro Augusto da Rosa, Ph. D.

Coorientador: Clayrton Monteiro Henrique, M. Sc.

Universidade Federal de Santa Catarina  
Centro de Florianópolis  
Departamento de Engenharia  
Elétrica

Florianópolis  
2022



Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,  
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Souza, Thomas Rodrigues de

Sensoriamento ótico de corrente em linhas de transmissão de energia elétrica : análise de calibração e sensibilidade / Thomas Rodrigues de Souza ; orientador, Mauro Augusto da Rosa, coorientador, Clayrton Monteiro Henrique, 2022.

68 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -  
Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico,  
Graduação em Engenharia Elétrica, Florianópolis, 2022.

Inclui referências.

1. Engenharia Elétrica. 2. Sensores óticos de corrente.  
3. Fontes óticas. 4. Transmissão de energia elétrica. 5.  
Monitoramento em tempo real. I. Rosa, Mauro Augusto da.  
II. Henrique, Clayrton Monteiro. III. Universidade Federal  
de Santa Catarina. Graduação em Engenharia Elétrica. IV.  
Título.



Thomas Rodrigues de Souza

**Sensoriamento Ótico De Corrente Em Linhas De Transmissão De Energia Elétrica:  
Análise De Calibração E Sensibilidade**

Este Trabalho Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do Título de “Bacharel em Engenharia Elétrica” e aceito, em sua forma final, pelo Curso de Graduação em Engenharia Elétrica.

Florianópolis, 22 de dezembro de 2022.



Documento assinado digitalmente

**Miguel Moreto**

Data: 22/12/2022 16:09:05-0300

CPF: \*\*\*.850.100-\*\*

Verifique as assinaturas em <https://v.ufsc.br>

---

**Prof. Miguel Moreto, Dr.**  
Coordenador do Curso de Graduação em Engenharia Elétrica

**Banca Examinadora:**



Documento assinado digitalmente

**Mauro Augusto da Rosa**

Data: 23/12/2022 18:07:53-0300

CPF: \*\*\*.652.400-\*\*

Verifique as assinaturas em <https://v.ufsc.br>

---

**Prof. Mauro Augusto da Rosa, Ph. D.**  
Orientador  
Universidade Federal de Santa Catarina



Documento assinado digitalmente

**GABRIEL SANTOS BOLACELL**

Data: 22/12/2022 16:31:03-0300

CPF: \*\*\*.099.000-\*\*

Verifique as assinaturas em <https://v.ufsc.br>

---

**Prof. Gabriel Bolacell, Dr.**  
Universidade Federal de Santa Catarina



Documento assinado digitalmente

**Thayane Skorupa**

Data: 22/12/2022 15:52:48-0300

CPF: \*\*\*.302.391-\*\*

Verifique as assinaturas em <https://v.ufsc.br>

---

**Thayane Skorupa, M. Sc.**  
Universidade Federal de Santa Catarina



# Agradecimentos

Agradeço à minha família, pela confiança e apoio constante que me motivaram ao longo de minha jornada acadêmica. Em especial, agradeço à minha querida mãe, que não mediu esforços para fornecer todo suporte que precisei e além. Por abrir mão de tanto, em meio a tantas dificuldades, para proporcionar o melhor futuro possível para seus filhos. Agradeço também aos meus amigos e colegas, pelo companheirismo e auxílio mútuo, dentro e fora das salas de aula. Aos professores e técnicos do DEEL, por todo conhecimento científico, técnico e profissional repassado a mim e meus colegas, e todo empenho em nos impulsionar. Destaco meu agradecimento especial ao Prof. Mauro Rosa, Ph. D. e Clayrton Monteiro Henrique, Ms. C. pela orientação e pela paciência, que possibilitaram a realização deste trabalho. Agradeço à UFSC, ao LabPlan, ao INESC Brasil P&D e à TBE pelo trabalho excepcional sendo realizado no projeto TECCON II, que proporcionou os meios para minha pesquisa.



# Resumo

Este trabalho apresenta um estudo do desempenho de sensores óticos de corrente aplicados a linhas de transmissão de energia elétrica, detalhando a metodologia e resultados dos ensaios realizados. Mais especificamente, compara a performance do sensoriamento de corrente utilizando fontes óticas de princípios distintos: ASE e laser DFB. O estudo se aprofunda no contexto do projeto TECCON II de aplicação de tecnologia ótica para monitoramento em tempo real de linhas de transmissão, realizando uma revisão teórica e do estado da arte dos principais conceitos relevantes para o escopo do trabalho, como instrumentação ótica, dispositivos inteligentes de monitoramento de sistemas de potência e técnicas de medição de corrente.

**Palavras-Chave:** 1. Sensor ótico. 2. Fonte ótica. 3. Transmissão de energia elétrica. 4. Monitoramento em tempo real.



# Abstract

This work presents a study of the performance of current optical sensors applied to electrical energy transmission lines, detailing the methodology and results of the conducted experiments. More specifically, compares the performance of current sensing utilizing optical sources of distinct principles: ASE and DFB laser. The study deepens into the context of the TECCON II project of optical technology application for real time monitoring of transmission lines, executing a theoretical and state of the art review of the main concepts relevant to the scope of the work, such as optical instrumentation, intelligent devices for power systems monitoring and current measurement techniques.

**Keywords:** 1. Optical sensor. 2. Optical source. 3. Electrical power transmission. 4. Real time monitoring.



# Lista de figuras

Figura 1 – Representação do efeito Faraday na polarização da luz.	28
Figura 2 – Esquema de funcionamento de sensor de corrente <i>bulk</i> .	29
Figura 3 – Esquema de funcionamento de sensor de corrente em fibra.	29
Figura 4 – Exemplo representativo de emissão estimulada.	31
Figura 5 – Modos de transmissão em fibras multimodo e monomodo.	32
Figura 6 – ASE através de fibra com dopagem RE.	33
Figura 7 – Largura dos espectros típicos de (a) LEDs (b) Laser FP (c) Laser DFB.	34
Figura 8 – Estrutura da fibra de laser DFB.	35
Figura 9 – Arquitetura básica do sistema SCADA.	36
Figura 10 – Arquitetura básica dos sistemas baseados em sincrofasores.	38
Figura 11 – (a) Medição PMU a 30 amostras por segundo (b) Medição POW do mesmo evento a 1 milhão de amostras por segundo.	40
Figura 12 – Estrutura da Solução TECCON.	42
Figura 13 – Diagrama de blocos da Solução TECCON.	42
Figura 14 – Esquemático do isolador polimérico e sensores óticos.	43
Figura 15 – (a) Fonte ASE BBS-C (b) Espectro da fonte ASE BBS-C	44
Figura 16 – Diagrama do condicionamento do sinal na placa eletrônica.	44
Figura 17 – Fonte ótica laser DFB utilizada.	47
Figura 18 – <i>Driver</i> de diodo laser utilizado com a fonte laser DFB.	47
Figura 19 – Diagrama de representação do <i>setup</i> para os ensaios.	48
Figura 20 – Encapsulamento dos sensores óticos para adaptação ao condutor.	48
Figura 21 – Fonte de corrente Jeanne.	49
Figura 22 – Placa eletrônica 6C.	49
Figura 23 – Vista da bancada com <i>setup</i> completo.	50
Figura 24 – Curvas de resposta por potência ótica para fonte ASE e DFB utilizando a placa 6C, a corrente de 100A	55
Figura 25 – Curvas de resposta por potência ótica para fonte ASE nas diferentes placas eletrônicas disponíveis, a corrente de 100A	55
Figura 26 – Curvas de resposta por potência ótica para fonte laser DFB na placa 6C, a corrente de 50A.	57
Figura 27 – Curvas de resposta por potência ótica para fonte laser DFB na placa 6C, a corrente de 25A.	58
Figura 28 – Curvas de resposta por potência ótica para fonte laser DFB na placa 6C, a corrente de 10A.	59

Figura 29 – Curvas de resposta por potência ótica para fonte laser DFB na placa	
6C. . . . .	60

# Lista de tabelas

Tabela 1 – Taxa de amostragem de cada sensor. . . . .	45
Tabela 2 – Padrão de nomenclatura dos arquivos de captura. . . . .	52
Tabela 3 – Média dos valores de resposta da placa eletrônica 6C por potência ótica definida em nível de corrente 100A (@1550nm). . . . .	54
Tabela 4 – Média dos valores de resposta da placa eletrônica 6C por potência ótica definida em nível de corrente 50A (@1550nm). . . . .	56
Tabela 5 – Média dos valores de resposta da placa eletrônica 6C por potência ótica definida em nível de corrente 25A (@1550nm). . . . .	57
Tabela 6 – Média dos valores de resposta da placa eletrônica 6C por potência ótica definida em nível de corrente 10A (@1550nm). . . . .	58
Tabela 7 – Valores utilizados na regressão linear para determinação da curva de calibração utilizando fonte laser DFB. . . . .	59



# Lista de Siglas e Abreviaturas

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AC	<i>Alternating Current</i>
ADC	<i>Analog-Digital Converter</i>
ASE	<i>Amplified Spontaneous Emission</i>
CCGR	Centro de Controle e Gestão da Rede
CCTV	<i>Close Circuit Television</i>
CLP	Controlador Lógico Programável
DC	<i>Direct Current</i>
DFB	<i>Distributed Feedback</i>
DWDM	<i>Dense Wavelength Division Multiplexing</i>
EM	Estação Meteorológica
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
FBG	<i>Fiber Bragg Grating</i>
FD	Fotodetector
FP	Fabry-Pero
GPS	<i>Global Positioning System</i>
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i>
IED	<i>Intelligent Electronic Device</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
IHM	Interface Homem-Máquina
IP	<i>Internet Protocol</i>
LAN	<i>Local Area Network</i>
LABPLAN	Laboratório de Planejamento de Sistemas de Energia Elétrica
LED	<i>Light-emitting Diode</i>
LT	Linha de Transmissão
MAC	<i>Media Access Control</i>
MTR	Monitoramento em Tempo Real
MTU	<i>Master Terminal Unit</i>
OPGW	<i>Optical Ground Wire</i>
PBS	<i>Polarizing Beamsplitter</i>
PDC	<i>Phasor Data Concentrator</i>
PMU	<i>Phasor Measurement Unit</i>
POW	<i>Point-On-Wave</i>
PTP	<i>Precision Time Protocol</i>
RE	<i>Rare-Earth</i>

RIG	<i>Rare-earth Iron Garnet</i>
RTU	<i>Remote Terminal Unit</i>
SCADA	<i>Supervisory Control and Data Acquisition</i>
SMFS	Sistema de Medição Fasorial Sincronizada
SQNR	<i>Signal-to-Quantization Noise Ratio</i>
SV	<i>Sampled Values</i>
TBE	Transmissora Brasileira de Energia
TC	Tranformador de Corrente
TCP	<i>Transmission Control Protocol</i>
TECCON	Tecnologia de Sensores em Fibras Ópticas para Supervisão, Controle e Proteção de Sistemas de Energia Elétrica
TIA	<i>Transimpedance Amplifier</i>
UDP	<i>User Datagram Protocol</i>
UFSC	Universidade Federal de Santa Catarina
VPN	<i>Virtual Private Network</i>
WDM	<i>Wavelength Division Multiplexing</i>

# Sumário

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>23</b>
<b>1.1</b>	<b>Objetivo</b>	<b>24</b>
<b>1.2</b>	<b>Motivação</b>	<b>25</b>
<b>2</b>	<b>REVISÃO DE LITERATURA</b>	<b>26</b>
<b>2.1</b>	<b>Sensores de corrente óticos</b>	<b>26</b>
<b>2.1.1</b>	<b>Sensores de corrente <i>bulk</i></b>	<b>27</b>
<b>2.1.2</b>	<b>Sensores de corrente totalmente em fibra</b>	<b>29</b>
<b>2.2</b>	<b>Fontes óticas</b>	<b>30</b>
<b>2.2.1</b>	<b>Fontes ASE</b>	<b>32</b>
<b>2.2.2</b>	<b>Fontes Laser DFB</b>	<b>34</b>
<b>2.3</b>	<b>SCADA</b>	<b>35</b>
<b>2.4</b>	<b>Sincrofasores e PMU</b>	<b>37</b>
<b>2.5</b>	<b>POW</b>	<b>39</b>
<b>3</b>	<b>ESTRUTURA DO PROJETO</b>	<b>41</b>
<b>4</b>	<b>METODOLOGIA</b>	<b>46</b>
<b>4.1</b>	<b>Setup</b>	<b>46</b>
<b>4.2</b>	<b>Medição de corrente</b>	<b>49</b>
<b>4.3</b>	<b>Ensaio</b>	<b>51</b>
<b>5</b>	<b>RESULTADOS</b>	<b>54</b>
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES</b>	<b>61</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>65</b>



# 1 Introdução

O cenário atual dos sistemas elétricos de potência, que incluem os sistemas de transmissão, é de inovação. O crescimento da demanda energética, necessidade de expansão das redes e interdependência entre sistemas são alguns dos principais desafios para esse setor, que é a uma das bases da civilização moderna. Além disso, a tendência moderna dos setores de energia elétrica é de busca por soluções inteligentes, que proporcionam adaptabilidade, rastreabilidade e integridade da rede.

Movidos por esses contextos, novas tecnologias e métodos de monitorar, proteger e controlar linhas de transmissão e subestações têm ganhado ênfase em pesquisa e desenvolvimento, dos quais se destacam técnicas de medição de sinais analógicos, como sincrofasores e *Point-On-Wave* (POW), e dispositivos de aquisição e comunicação integrados, como *Supervisory Control and Data Acquisition* (SCADA) e *Phasor Measurement Unit* (PMU). Além de trazerem uma série de benefícios em precisão e segurança, muitas das tecnologias mencionadas se adequam às normas definidas pelas maiores organizações de padronização do setor elétrico, como *International Electrotechnical Commission* (IEC) e *Institute of Electrical and Electronics Engineers* (IEEE), impulsionando o processo de renovação dos sistemas de potência.

Paralelamente, o crescente interesse de mercado em adaptar as tecnologias convencionais de transmissão e recepção de sinais às alternativas óticas - movimento já observado nos sistemas de comunicação de rede - é algo relevante para os futuros engenheiros eletricitistas de sistemas de potência. Devido à sua velocidade de transmissão, proteção contra interferências, segurança e redução do volume de material, as tecnologias de sinal ótico têm se favorecido e ganhado visibilidade em diferentes áreas. A aplicação de tamanho potencial de inovação na área de transmissão de energia elétrica é um passo natural, que inclui a Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) como pioneira.

O objeto de estudo deste trabalho agrega duas áreas de crescente inovação nas últimas décadas: tecnologia de sinais óticos e monitoramento de linhas de transmissão. Esta junção culminou no projeto de pesquisa e desenvolvimento Tecnologia de Sensores em Fibras Ópticas para Supervisão, Controle e Proteção de Sistemas de Energia Elétrica (TECCON) II, pelo INESC P&D Brasil em parceria com a TBE e universidades de todo Brasil, cuja solução desenvolvida é um sistema integrado de monitoramento em tempo real de linhas de alta tensão, utilizando sensoriamento ótico para medição de grandezas físicas, como corrente elétrica, tração mecânica e temperatura. Atualmente, conta com um exemplar instalado em uma linha de transmissão de 230 kV situada no município de Abdon Batista, no estado de Santa Catarina.

O LabPlan possui um laboratório para pesquisadores e desenvolvedores realizarem validações do projeto onde, dados os recursos disponíveis, que incluem uma bancada experimental, um vasto acervo bibliográfico e a orientação do Prof. Mauro Augusto da Rosa, Ph. D. e Clayrton Monteiro Henrique, M. Sc., foram realizados estudos e ensaios acerca do desempenho da solução desenvolvida.

## 1.1 Objetivo

Um dos principais objetivos do presente Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) é a realização de ensaios experimentais sobre o sensoriamento de corrente do TECCON II. O enfoque dos experimentos é validar o funcionamento de uma fonte ótica alternativa para a solução, denominada fonte laser *Distributed Feedback* (DFB), e comparar seu desempenho àquele obtido com a fonte *Amplified Spontaneous Emission* (ASE), que atualmente está instalada na solução. A fim de expandir o conhecimento a respeito da resposta do sistema e facilitar a busca pela configuração ótima da solução, o trabalho dá continuidade ao procedimento experimental implementado por Clayrton M. Henrique (2021), utilizando uma reconfiguração da estrutura do projeto.

Adicionalmente, um dos objetivos deste TCC é realizar estudos acerca das tecnologias óticas de sensoriamento de corrente em linhas de transmissão, discorrendo sobre o ferramental ótico atual e o estado da arte das estruturas e dispositivos de monitoramento de sistemas de transmissão. O conhecimento desses fatores permite contextualizar o projeto TECCON II no cenário atual do sistema elétrico e embasa conceitos fundamentais análise para os ensaios conduzidos. O estudo é realizado através da revisão de literatura relevante para cada um dos temas.

Sobre sensores óticos de corrente e fontes óticas, o foco da revisão está nos princípios de funcionamento e aspectos construtivos de cada um dos itens abordados. Para fins de compreensão dos resultados dos ensaios e seus impactos, também são estabelecidos comparativos entre dispositivos análogos.

A respeito dos sistemas de monitoramento em tempo real, almeja-se descrever as principais metodologias de aplicação, com foco em conhecer as estruturas e técnicas de operação desses sistemas. O estudo é conduzido a fim de não só compreender os avanços tecnológicos observados nesse setor nas últimas décadas, mas também esclarecer desafios e oportunidades de inovação.

Como objetivos mais específicos, se destaca a familiarização com o projeto TECCON II, cuja estrutura foi utilizada para condução de ensaios. Por se tratar de uma solução de monitoramento e proteção de linhas de transmissão que implementa sensores óticos, as revisões e pesquisas realizadas sobre os tópicos isolados embasam e contextualizam o exposto sobre o TECCON II. Embora o projeto reúna uma pluralidade de funções, o estudo traz maior detalhamento para as questões pertinentes

à medição de corrente, como metodologia de sensoriamento e processamento dos dados obtidos.

## 1.2 Motivação

A tendência do mercado atual de soluções de Monitoramento em Tempo Real (MTR) em sistemas de transmissão de energia elétrica é de renovação, para superar os desafios do setor, decorrentes do crescente interesse em expansão das redes de abastecimento e mitigação de riscos à segurança dos operadores, da população e dos dispositivos. A fim de acompanhar esse cenário, engenheiros e desenvolvedores do setor devem se familiarizar com o estado da arte de sistemas MTR. Entendendo essa necessidade, o presente trabalho tem a intenção de disseminar informação e munir a ciência sendo desenvolvida utilizando sensores óticos, com a expectativa de acelerar o progresso de implementação dessas tecnologias e fomentar pesquisas.

O trabalho desenvolvido até o momento pelos pesquisadores envolvidos no projeto TECCON II, dos colaboradores do INESC P&D Brasil e universidades parceiras, compete a um dos mais relevantes progressos da ciência brasileira para a área de sistemas de transmissão. Os ganhos em eficiência energética, segurança e redução do volume de material (entre outros) alcançados pela implementação de tecnologias óticas, assim como a vasta gama de grandezas sendo monitoradas localmente em tempo real, demonstram o potencial de sucesso do projeto e remetem ao possível futuro da comunicação e controle nos setores de energia. Um importante motivador é agregar ao conhecimento e desenvolvimento desse projeto inovador, que já é referência mundial em tecnologias de monitoramento de linhas de transmissão de alta tensão e está em processo de validação para expansão e lançamento de futuras versões.

A oportunidade de realizar um Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Elétrica que trata de tecnologias tão inovadoras e inteligentes é altamente gratificante. Poder observar os fenômenos físicos de uma maneira analítica e precisa, graças aos conhecimentos teóricos e técnicos adquiridos ao longo dos cinco anos em formação, fomenta o aspecto prático do trabalho. Desenvolver um estudo com acesso a instrumentos inéditos e poderosos, recursos bibliográficos de alta qualidade e mentes brilhantes do Departamento de Engenharia Elétrica e Eletrônica da UFSC são alguns dos fatores que energizam e motivam o compromisso com este trabalho.

## 2 Revisão de Literatura

Neste capítulo, serão descritos aspectos observados durante os estudos sobre ferromagnético de comunicação e sensoriamento ótico, aquisição de dados e controle de sistemas elétricos de potência, com especial destaque aos fundamentos de funcionamento, perspectivas de aplicação e estado da arte. A familiarização com os tópicos selecionados permite uma maior compreensão da Solução TECCON e do projeto de pesquisa e desenvolvimento TECCON II, cujos tópicos específicos de relevância para este trabalho são detalhados, como concepção, estrutura e medição de corrente elétrica.

### 2.1 Sensores de corrente óticos

De acordo com A.B.L Ribeiro *et al.* (2005), sensores de fibra ótica são dispositivos no qual a luz guiada pela fibra ótica interage com um mensurando físico, químico, biológico ou eletromagnético, com o intuito de produzir sinais óticos relacionado com o parâmetro mensurado. A informação do sinal é contida nas propriedades da luz, como intensidade luminosa, frequência e polarização, que, dependendo da aplicação, se alteram de acordo com o efeito medido. Ao interrogar o sinal luminoso, é possível extrair a informação do parâmetro de interesse através da decodificação das características do sinal luminoso.

A fibra ótica e seu constituinte principal, a sílica, são eletromagneticamente passivos, o que acarreta em uma série de vantagens operacionais para aplicação em sistemas de sensoriamento, quando se comparado aos meios elétricos convencionais. Tal característica da fibra ótica permite que a operação em situações onde o campo elétrico é elevado. A resistência à interferência eletromagnética e à agentes químicos e biológicos da sílica também possibilita o uso de material reduzido em peso e volume para encapsulamento da fibra. Outro benefício da fibra ótica é sua baixa atenuação, permitindo que a transmissão do sinal seja realizada a longas distâncias, onde a unidade de monitoramento se encontra afastada dos pontos de medição, que não possuem componentes eletricamente ativos (RIBEIRO *et al.*, 2005). Além disso, proporciona vantagens à aplicações de multiplexação de grande número de sensores operados através de uma única central de monitoramento.

Tratando-se de sensores de corrente, Ricardo Silva *et al.* (2012) e Fábio de Nazaré (2014) destacam outras vantagens, além das previamente mencionadas, da aplicação de fibra ótica como sensor propriamente dito, dentre elas o isolamento elétrico, por sensores óticos serem majoritariamente compostos por material dielétrico. Também

oferecem a possibilidade de medição em corrente alternada e corrente contínua, diferentemente dos sensores de corrente para aplicação em alta tensão convencionais. A ausência de efeito de saturação e o consumo reduzido de energia dos sensores óticos favorecem a utilização dessa tecnologia (NAZARÉ, 2014).

Transformadores de corrente cuja medição de corrente elétrica é realizada através sensores óticos definem os dispositivos chamados Transformadores de Corrente (TC) óticos (CHAVES, 2008). Se comparados aos TC's convencionais, a ausência de um núcleo ferromagnético os proporciona menor volume e massa aos TC's óticos. Dorival K. Lima (2009) define transformadores de corrente óticos como elementos passivos, por seu funcionamento não depender de uma alimentação primária e não possuir componentes ativos onde o sensor ótico é ligado ao sistema de alta tensão, tornando-os livres de interferências eletromagnéticas e riscos de explosão (MEDEIROS, 2016) (LIMA, 2009).

Em sua dissertação, Pedro Jorge (2001) pontua que os sensores óticos de corrente elétrica se baseiam no efeito Faraday e se dividem em três categorias construtivas: sensores óticos em *bulk*, sensores óticos totalmente em fibra e sensores com mecanismos sensíveis ao campo magnético. Embora esta última categoria tenha ganhado destaque no desenvolvimento das tecnologias de sensoriamento ótico de corrente, os sensores em *bulk* e totalmente em fibra constituem os modelos comerciais atuais (NASCIMENTO, 2016).

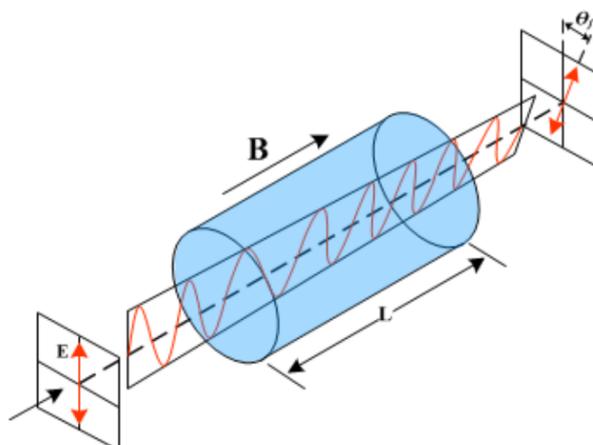
### 2.1.1 Sensores de corrente *bulk*

Segundo A. B. Lobo Ribeiro *et al.* (2005), os sensores de corrente *bulk* opera através do acoplamento entre o sinal luminoso transmitido via fibra e o elemento sensível, usualmente um prisma de vidro ou cristal. O sinal resultante da medição é transmitido até a unidade processadora (RIBEIRO *et al.*, 2005).

O prisma ou cristal sensível tem seu funcionamento baseado no efeito Faraday, fenômeno estudado e descrito pela primeira vez em 1845 pelo cientista britânico Michael Faraday. Este é um fenômeno megneto-ótico da luz linearmente polarizada que se propaga em um meio com propriedades específicas e tem seu plano de polarização rotacionado à presença de campo magnético. Durante a exposição ao campo magnético, as duas componentes circularmente polarizadas que compõem a luz linearmente polarizada se propagam em velocidades diferentes, resultando em um acúmulo de diferença de fase, que por sua vez implica na rotação do plano de polarização da onda linear (BOHNERT; GABUS; BRÄNDLE, 2003). O ângulo de polarização do feixe incidente é proporcional à intensidade de campo magnético. A característica magneto-ótica do meio de propagação que possibilita esse efeito é determinada a partir do material selecionado, sua temperatura e comprimento, representada matematicamente

pela constante de Verdet (BLAKE *et al.*, 2016). A Figura 1 representa o efeito na luz polarizada atravessando um prisma e a Equação 2.1 descreve a variação ângulo do plano de polarização da luz (SILVA *et al.*, 2012).

Figura 1 – Representação do efeito Faraday na polarização da luz.



Fonte: Adaptado de (SILVA *et al.*, 2012).

$$\beta = \int BV \, dl \quad (2.1)$$

onde:

$\beta$  : Rotação do ângulo de polarização da luz.

$B$  : Densidade de fluxo magnético na direção de propagação.

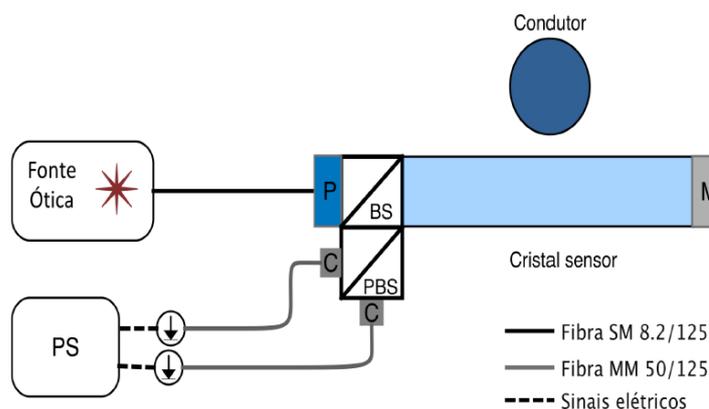
$V$  : Constante de Verdet.

$L$  : Comprimento do meio de propagação.

$dl$  : Incremento do comprimento do meio de propagação.

Para que o efeito Faraday se manifeste, a luz transmitida ao sensor de corrente *bulk* deve ser previamente polarizada, utilizando um polarizador seguido de um cubo divisor de feixe, que incide somente o sinal desejado pelo elemento sensível. O sinal atravessa o prisma ou cristal, que se encontra próximo do condutor, e é refletido sobre um espelho, a fim de ampliar a sensibilidade e proporcionar maior resistência aos efeitos lineares birrefringentes recíprocos (NASCIMENTO, 2016). Em seguida, da luz refletida são extraídas as componentes ortogonais pelo cubo divisor de polarização. Finalmente, os dois sinais ortogonais são recebidos por fotodetectores para etapa de processamento (MEDEIROS, 2016). A Figura 2 representa uma configuração de sensor de corrente *bulk*.

Figura 2 – Esquema de funcionamento de sensor de corrente *bulk*.



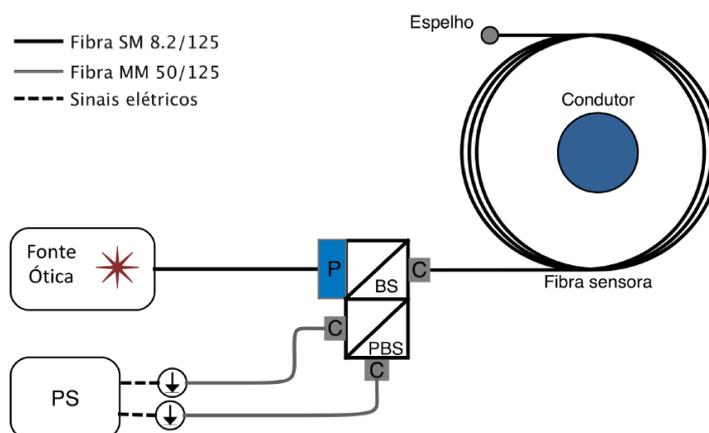
Fonte: (MEDEIROS, 2016).

### 2.1.2 Sensores de corrente totalmente em fibra

Segundo F. C. Dias (1998), comparados aos sensores de corrente *bulk*, os sensores em fibra ótica são construtivamente mais simples. Utilizam como elemento sensível enrolamentos de fibra em torno do condutor de corrente de alta tensão. Assim como no caso anterior, essa metodologia faz uso do efeito Faraday para seu funcionamento, portanto, tem uma estrutura de operação semelhante ao caso *bulk*, apropriando-se de polarizadores, divisores de feixe e espelhos (DIAS, 1998).

Estes sensores fazem uso da característica magneto-ótica intrínseca da fibra, tornando-a o meio de transmissão do sinal e elemento sensível. Para se atingir o efeito de rotação de polarização desejado, é usual que sejam realizadas quantidades arbitrárias de voltas de fibra em torno do condutor, para o qual se define um valor ótimo empiricamente (JORGE, 2001) (BRÍGIDA, 2017). A Figura 3 representa uma configuração de sensor de corrente totalmente em fibra.

Figura 3 – Esquema de funcionamento de sensor de corrente em fibra.



Fonte: (MEDEIROS, 2016).

## 2.2 Fontes óticas

Segundo John M. Senior (2009), as fontes de luz (ou fontes óticas) são os elementos ativos fundamentais para o funcionamento dos sistemas óticos, emitindo o sinal de entrada destes circuitos. De maneira geral, tratam-se de transdutores eletro-óticos, ou seja, geram sinal luminoso de acordo com a entrada em sinal elétrico, modulando a informação de um meio (condutores de corrente elétrica, como cabos coaxiais) para outro (cordões de fibra ótica). As fontes utilizadas para esse feito se enquadram em uma de duas categorias fundamentais: laser semiconductor (ou diodo laser) e Diodo Emissor de Luz (LED). Embora existam outras possibilidades, o advento dos materiais semicondutores permitiu aos sistemas óticos menor distorção do sinal, menores perdas de transmissão e mínima dispersão devido ao espectro de comprimento de onda mais estreito, favorecendo os dois tipos previamente mencionados. O meio de transmissão é a fibra ótica, responsável pela condução guiada do sinal até o receptor, que consiste de fotodetectores responsáveis pela demodulação e transdução do sinal luminoso para elétrico, a partir do qual a informação é processada utilizando eletrônica e circuitos digitais (SENIOR, 2009).

Ambas tecnologias laser semiconductor e LED utilizam princípios de radiação dos semicondutores, consistindo majoritariamente destes materiais. Apesar disso, existem duas categorias de emissão de luz para esses elementos. A emissão espontânea ocorre quando átomos excitados da junção P-N polarizada possuem elétrons em camadas de energia elevada, uma situação instável que se resolve com o deslocamento dos elétrons para camadas mais estáveis, dissipando energia em forma de fótons durante o processo, cujo comprimento de onda depende da quantidade de energia dissipada (IBM, 1998). O tempo de vida de um elétron em estado instável até seu decaimento é de cerca de 10 a 100 ns para espectros de luz visível. A relação entre a luz radiada e a diferença de energia entre as camadas instáveis e estáveis está exposta na **Equação 2.2**.

$$\Delta E_{21} = hf_{21} = \frac{hc}{\lambda_{21}} \quad (2.2)$$

onde:

$\Delta E_{21}$  : Diferença energética entre camada instável (2) e camada estável (1).

$h$  : Constante de Planck ( $6,63 \times 10^{-34} J \cdot s$ ).

$f_{21}$  : Frequência da onda emitida.

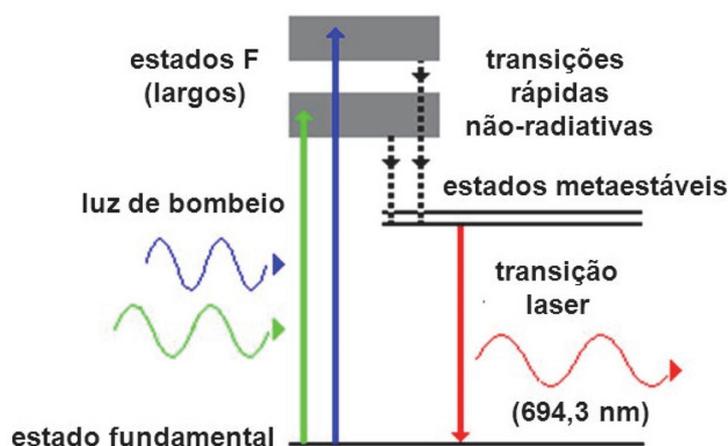
$c$  : Velocidade da luz ( $3 \times 10^8 m/s$ ).

$\lambda_{21}$  : Comprimento da onda emitida.

A outra categoria é a emissão estimulada, na qual elétrons em estado estável (fundamental) são estimulados por fótons (luz de bombeio), elevando seus estados

energéticos. Após alguns instantes, os elétrons decaem para um estado semi estável (metaestável), a partir do qual, ao decair novamente para o estado fundamental, radia um novo fóton, de mesmo comprimento de onda, fase e direção do fóton estimulante, permitindo maior diretividade e potência da onda radiada. Lasers semicondutores são definidos pela irradiação estimulada, fato que se torna evidente pela sigla LASER, Amplificação de Luz por Radiação de Emissão Estimulada (do inglês, *Light Amplification by the Stimulated Emission of Radiation*), embora uma porcentagem da radiação seja sempre espontânea, pela dificuldade prática de limitar este processo inerente aos semicondutores (SILVA DE SOUSA, 1999). No contexto de comunicação e sensoriamento ótico, a emissão estimulada é mais utilizada. A Figura 4 exemplifica uma situação de radiação estimulada.

Figura 4 – Exemplo representativo de emissão estimulada.



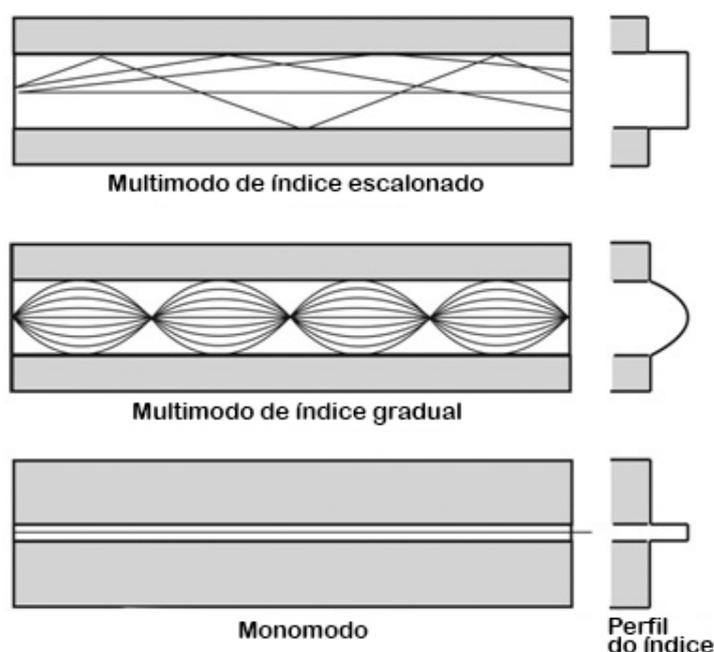
Fonte: (DAVIDOVICH, 2015).

A escolha da fonte ótica apropriada para uma dada aplicação depende dos objetivos e recursos de projeto. A emissão estimulada das fontes de laser semicondutor concede a esses elementos maior potência fornecida se comparado às alternativas de LED, usualmente em torno de  $100\mu W$ , enquanto os LEDs mais potentes emitem até  $75\mu W$ , (WANG, 2012). O princípio de funcionamento dos lasers também garante espectros mais estreitos e maior coerência de onda sem a utilização de filtros, conferindo menor dispersão e ruídos que grande parte dos LEDs. Em decorrência do espectro de banda estreita, os dispositivos lasers são mais utilizados para transmissão monomodo, método de transmissão de ondas centradas em um único comprimento de onda, permitindo modo de propagação essencialmente linear na cavidade da fibra, diferentemente das fontes de banda larga, que usualmente transmitem a multimodo, onde múltiplos comprimentos de onda se dispersão na cavidade. A Figura 5 representa os padrões de fibra e os modos de dispersão mais comuns. Fibras monomodo são utilizadas para propagação a longas distâncias devido à baixa atenuação e alta velocidade. Fibras multimodo têm diâmetros maiores e cavidades ressoantes, sendo as

de índice escalonado raramente são utilizadas, devido ao desempenho muito inferior às de índice gradual, implementadas em sistemas onde o espectro de banda larga é desejado e a curtas distâncias, como aplicações de *Local Area Network* (LAN), *Close Circuit Television* (CCTV) e outros sistemas de segurança (HAYES, 2022).

Apesar das vantagens operacionais, lasers semicondutores são tipicamente mais onerosos e de difícil fabricação. De maneira geral, a modulação do sinal em uma dada aplicação também implica no favorecimento de um tipo de fonte sobre o outro, já que, para sinais digitais, lasers semicondutores são os únicos elementos que alcançam pulsos na ordem de gigabits por segundo, enquanto a resposta linear de radiação dado fluxo de corrente confere aos LEDs maior facilidade para modulação analógica (IBM, 1998).

Figura 5 – Modos de transmissão em fibras multimodo e monomodo.



Fonte: (HAYES, 2022).

Como é costumeiro em tecnologias de semicondutores, as fontes óticas também possuem uma vasta quantidade de subcategorias e exemplares implementados para aplicações específicas. As alternativas para dopagem, configurações geométricas e acoplamento com outros componentes populam o mercado de dispositivos óticos com diferentes modelos e variantes. Para limitar aos elementos relevantes para o trabalho, são expandidos os temas a cerca de fontes óticas ASE e laser DFB.

### 2.2.1 Fontes ASE

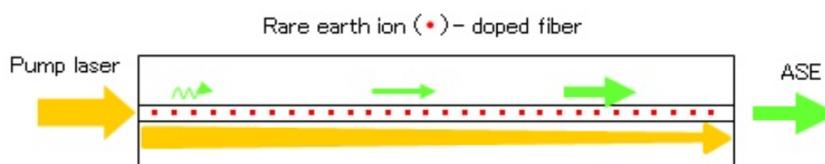
De maneira geral, emissão espontânea amplificada, ou ASE, é um fenômeno indesejado das fontes óticas, que ocorre até mesmo nos lasers semicondutores mais

precisos, mas cujos efeitos podem ser mitigados. Em grande parte das aplicações, a atenuação do sinal luminoso na fibra é excessiva, situação usualmente contornada pelo acoplamento de amplificadores ópticos às fontes. Como John M. Senior (2009) destaca, estes elementos atingem seus objetivos realizando evolução periódica da amplitude do pulso, entretanto, geram acúmulo de ruído causado pela emissão espontânea, fenômeno de radiação aleatória intrínseco dos semicondutores (visto em maior detalhe na seção 2.2), comprometendo a qualidade e coerência do sinal. Adicionalmente, ASE é responsável pelo efeito Gordon–Haus, que ocasiona oscilações e dispersões da onda (WANG *et al.*, 2022).

Apesar disso, modelos estocásticos de previsão da emissão espontânea permitiram maior controle sobre a ASE. Um modelo estatístico, obtido da abordagem da mecânica quântica, permitiu corresponder a distribuição de probabilidade da quantidade de fótons emitidos à distribuição de degeneração Bose-Einstein (SHIMODA; TAKAHASI; H. TOWNES, 1957). Esse e outros modelos de previsão, quando aplicados às fontes ASE, garantem maior controle sobre a largura de banda e estabilidade da densidade de potência quando operam em regime permanente, transformando o que historicamente eram classificadas como elementos caóticos em fontes de ondas coerentes, segundo Nicolas Valero (2021).

Por conta do princípio fundamental de funcionamento, os espectros de comprimento de onda emitidos são majoritariamente de banda larga, devido às frequências de banda lateral, originárias da emissão espontânea, que são amplificadas juntamente com a fundamental. Usualmente, as fontes óticas ASE são construídas utilizando filtros de dopagem de terras raras, ou dopagem RE (*Rare-Earth doping*), o que confere a esses elementos baixa atenuação, onda de saída não polarizada e de banda especialmente larga (até 100 nm de largura em alguns casos). O elemento dopante influencia no comprimento de onda central de radiação e na largura de banda. A dopagem é realizada no interior da fibra, conforme representado na Figura 6, onde a luz de bombeio atenua com o comprimento da fibra, enquanto a luz ASE aumenta em potência (SENIOR, 2009).

Figura 6 – ASE através de fibra com dopagem RE.



Fonte: (FIBERLABS, 2021).

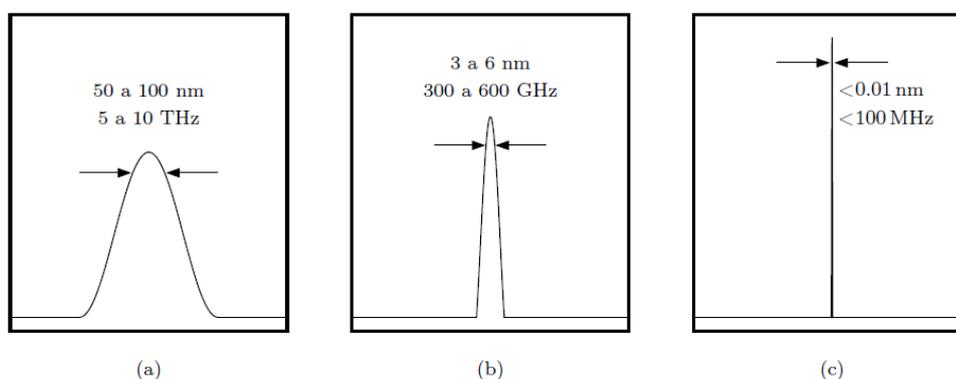
Atualmente, diferentes variedades de fontes que utilizam o fenômeno ASE como princípio de funcionamento são implementadas com sucesso em diferentes aplica-

ções. Sensores de Bragg, giroscópios de fibra ótica, sensoriamento de gases e medição de componentes óticos são algumas das aplicações onde fontes óticas ASE já estão difundidas, alcançando excelentes resultados de qualidade de sinal e estabilidade (IBM, 1998).

## 2.2.2 Fontes Laser DFB

Historicamente, os lasers semicondutores surgiram para sanar alguns dos problemas enfrentados com as fontes de LED. A supressão da transmissão multimodal pela alternativa monomodo foi um dos primeiros objetivos do desenvolvimento dessas tecnologias, dando surgimento aos primeiros lasers semicondutores, como o laser Fabry-Perot, ou laser FP. Embora tenha-se alcançado progresso no estreitamento da largura de banda da onda emitida por esses elementos, dificilmente se atingia a transmissão monomodo com as fontes laser FP, devido à existência de vários modos ressoantes na cavidade da fibra. Os lasers de retroação distribuída, ou DFB, atingem o objetivo de banda estreita e, por consequência, de transmissão monomodo através de reflexões realizadas ao longo de toda a cavidade de forma distribuída, devido à variação periódica no índice de refração na zona ativa (BOAVIDA, 2009). A Figura 7 mostra exemplos de espectros obtidos com diferentes fontes óticas, incluindo o laser DFB.

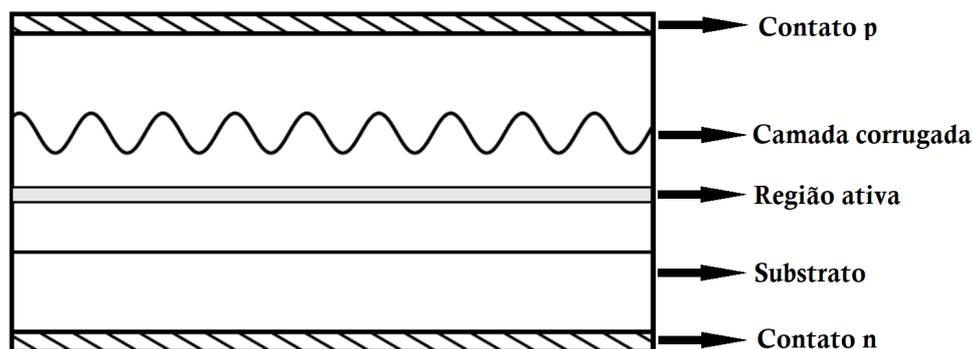
Figura 7 – Largura dos espectros típicos de (a) LEDs (b) Laser FP (c) Laser DFB.



Fonte: (BOAVIDA, 2009).

A retroação ressonante permite a maior seletividade do comprimento de onda. A estrutura faz uso de redes de Bragg, que constituem em modulação local e periódica do índice de refração do núcleo da fibra, geralmente construído com altas concentrações de germânio na fibra (BASTOS, 2016). Tal modulação se dá a partir de corruções em intervalos específicos do comprimento longitudinal da fibra. As redes de Bragg funcionam como refletores seletivos, também chamados de filtros refletores, o sentido do feixe de espectro estreito (refletido) é contrário ao do feixe incidente (SENIOR, 2009). A estrutura das redes de Bragg podem ser vistas na Figura 8.

Figura 8 – Estrutura da fibra de laser DFB.



Fonte: Adaptado de (BOAVIDA, 2009).

## 2.3 SCADA

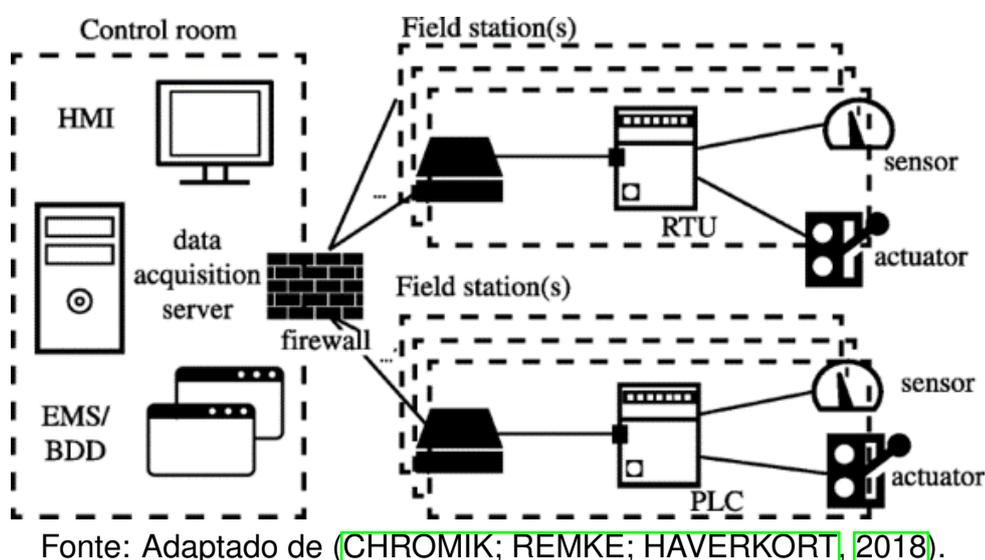
Anualmente, o Brasil consome uma grande quantidade de potência elétrica que aumenta ano após ano. Segundo dados da Empresa de Pesquisa energética (EPE), em 2021, foram consumidos cerca de 497 TWh, correspondendo a um aumento de 4,6% comparado ao ano anterior (EPE, 2022). A crescente demanda é um perfil mundial e incide em uma série de desafios para todo os setores do sistema elétrico de potência. Esse aumento é um dos principais desafios para os sistemas de transmissão de energia elétrica brasileiro e internacionais, que têm demonstrado forte interesse em se inovar e ampliar. Além da necessidade de expansão do fornecimento a regiões previamente não abastecidas, a renovação do instrumental utilizado para monitoramento das linhas tem se tornado imperativa. Aliado às inovações de armazenamento e processamento de dados, sensoriamento, monitoramento e segurança, a tecnologia de Controle Supervisório e Aquisição de Dados, ou SCADA, surge como a aplicação destes conceitos fundamentais ao âmbito dos sistemas elétricos de potência.

A denominação SCADA se refere ao conjunto de dispositivos, programas e funcionalidades de operação de sistemas elétricos de potência, tendo aplicação nos seus diferentes setores. Tais tecnologias dedicadas para sistemas de transmissão têm como principal função permitir que operadores de uma subestação (ou planta) monitorem e operem remotamente os processos de uma instalação, usualmente o pátio de uma subestação ou linhas distantes do centro de controle (SCHOLL, 2015). São compostos de instrumentos de aquisição empregados nas instalações, que se comunicam com a central de controle e operações, a qual recebe informações pré processadas sobre os mecanismos ou fenômenos monitorados e os opera através de sinais de controle emitidos remotamente, através de interfaces de alto nível (CONSTAIN, 2011). Como Juliana Gubert Ehrensperger define (2004), o sistema SCADA funciona com uma base de dados provenientes das medidas redundantes analógicas e digitais, obtidos em intervalos regulares de tempo e processados pelo ferramental computacional, que inclui

o Estimador de Estados e Configurator de Rede, permitindo visibilidade sobre a situação do item monitorado, virtualmente em tempo real.

O sistema SCADA é caracterizado por sua arquitetura, representada na [Figura 9](#), através da qual o operador domina uma grande parcela dos processos de interpretação de informações e controle. Mediado via Interface Homem Máquina (IHM), usualmente instalada em um computador que permita o monitoramento de estado, operadores realizam o envio de comandos e alteração de valores. A IHM pode ser composta por campos de texto, tabelas ou demais representações gráficas, além de um resumo das informações colhidas em tempo real ou em um histórico de aquisição, possibilitando a extração de relatórios para registrar fenômenos ou perturbações observados em um dado processo físico, como por exemplo, corrente elétrica ([MÜLLER, 2017](#)).

Figura 9 – Arquitetura básica do sistema SCADA.



A Estação Central, ou Unidade Terminal Principal (MTU), opera como foco de coleta, armazenamento e processamento a ser acessado pelos usuários através da IHM. A MTU reúne em bancos de dados do servidor SCADA as informações colhidas pelas Estações Remotas, ou Unidades Terminais Remotas (RTU), através da comunicação de rede, usualmente em protocolo TCP/IP ([CONSTAIN, 2011](#)). Na maioria das aplicações, MTU e RTU estão em posições distantes entre si, os sinais de rede podem ser transmitidos em uma variedade de meios físicos, como cabos coaxiais, fibras óticas, rádio e via satélite ([MÜLLER, 2017](#)) ([SCHOLL, 2015](#)). A RTU faz a interface entre os dispositivos de campo (sensores, atuadores, etc.) e MTU, estando ligada diretamente a ambos ([HENRIQUE, 2021](#)). A implementação deste sistema se dá, usualmente, através do uso de Comparador Lógico Programável (CLP), devido à sua vantagem de configuração e utilidade.

Os dispositivos de campo, apesar de não constituírem diretamente o sistema SCADA, são parte indispensável da arquitetura, pois permitem ao operadores acesso aos pa-

râmetros monitorados, dados adquiridos e sinais de controle que se desejam enviar (HENRIQUE, 2021). São classificados como dispositivos de campo os sensores e atuadores, que correspondem à aquisição e ao controle, respectivamente, aplicados em campo diretamente como instrumental de medição ou automação do processo físico, como por exemplo, corrente elétrica em linhas de transmissão (SCHOLL, 2015) (MÜLLER, 2017).

Por mais que a inovação dos sistemas SCADA tenha promovido enorme ganho de qualidade em monitoramento e controle de instalações de potência, ainda apresenta desafios de amostragem. Embora o valor exato dependa dos dispositivos que compõem o sistema, a taxa de amostragem padrão de um sistema SCADA se encontra na ordem unidades de segundo, o que para muitas aplicações é indesejado, dada a necessidade de sincronia de informação e atuação rápida para contenção de falhas. Como alternativa a isso, surgem os sincrofasores (SMFS) e os dispositivos PMU (HENRIQUE, 2021).

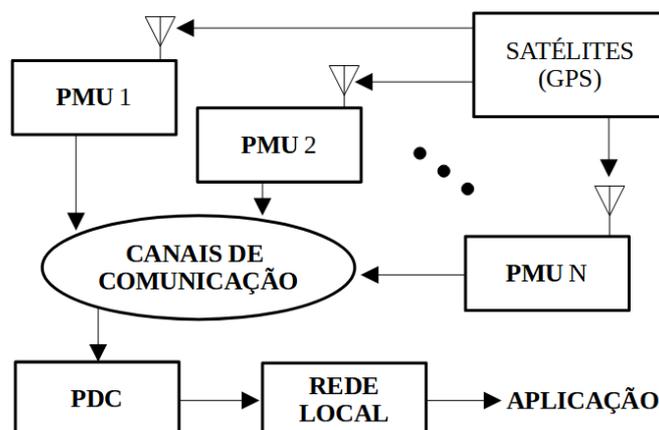
## 2.4 Sincrofasores e PMU

Os modelos de monitoramento e aquisição de dados baseados em sincrofasores surgiram como complemento ao sistema SCADA. SMFS operam com aquisição em tempo real, favorecendo a utilização destes em instalações de sistemas elétricos de potência, nas quais as eventuais perturbações devem ser monitoradas e retificadas com extrema agilidade, o que o sistema SCADA convencional apresenta dificuldade de promover, dada sua taxa de amostragem de dados significativamente mais lenta. O crescente desenvolvimento e aplicação de sincrofasores em múltiplos países evidencia a priorização de sistemas ágeis (ZARZOSA, 2016) (HENRIQUE, 2021).

A arquitetura dos sincrofasores, ilustrada na Figura 10, destaca as principais parcelas desses sistemas (VIEIRA, 2014) (KOPKO, 2018). A PMU é um dispositivo eletrônico responsável pela aquisição e pré processamento dos dados, amostrando os sinais analógicos (sensores) e digitais (atuadores) em taxas altas, geralmente até 60 amostras por segundo. A PMU recebe constantemente sinais de sincronismo recebidos pelo sistema GPS, usualmente utilizando Protocolo de Precisão de Tempo (PTP - *Precision Time Protocol*), fornecendo a esse sistema cronologia de aquisição assegurada (HENRIQUE, 2021). A alta taxa de amostragem aliada ao sincronismo em tempo real permite o armazenamento dos valores medidos em forma fasorial, o que é de enorme vantagem para sistemas elétricos trifásicos em corrente alternada, que dependem de exatidão na determinação de fase entre as grandezas elétricas (KOPKO, 2018) (MARTINS, 2018) (EHRENSPERGER, 2004).

O Concentrador de Dados Fasoriais ou *Phasor Data Concentrator* (PDC) recebe os valores fasoriais processados nas PMU. Uma etiqueta de tempo em cada medida

Figura 10 – Arquitetura básica dos sistemas baseados em sincrofasores.



Fonte: Adaptado de (VIEIRA, 2014) e (KOPKO, 2018).

permite ao PDC organizar cronologicamente os dados recebidos, assegurados de sua conformação temporal pelo sincronismo provido localmente às PMU. O PDC coleta, concentra e ordena as medidas por sequência temporal, via leitura das etiquetas de tempo, e por PMU ou demais PDC atrelados aos dados recebidos, para enfim disponibilizar os dados aos usuários e aplicações em tempo real, ou em forma de histórico quando opera *off-line* (LEANDRO, 2014) (ZARZOSA, 2016).

Os Canais de Comunicação realizam as transferências de dados entre os dispositivos utilizados para coleta a apresentação de informação. Embora a comunicação em rede possa transcorrer em diferentes meios, para aplicações de SMFS em sistemas elétricos de potência é usual que se utilize cabeamento de padrão Ethernet, fibra ótica, ou em meios não guiados como rádio e internet (VPN). Apesar de ser amplamente difundido por sua facilidade de implementação em segurança, o protocolo TCP/IP cai em detrimento do UDP/IP, devido à grande capacidade de tráfego de dados e baixa latência (ARRUDA, 2017).

A rede local (ou corporativa) promove a interface entre o PDC e os usuários nos terminais da aplicação, munidos de computadores com programas dedicados e monitores que permitem a visualização das interfaces gráficas em alto nível. Os programas existentes para este tipo de aplicação proporciona aos operadores a oportunidade de rastrear perturbações, extrair relatórios, monitorar avisos e alarmes, entre outras funcionalidades específicas para cada instalação.

Os sensores de processos físicos compõem a variedade de dispositivos em campo, de onde se extrai diretamente as medições e variações de um determinado fenômeno. Foram expostos os princípios de operação de PMU no contexto de sincrofasores, mas, atualmente, outro método de amostragem ganha destaque e maior implementação nos sistemas elétricos de potência, o chamado *Point-On-Wave* ou POW.

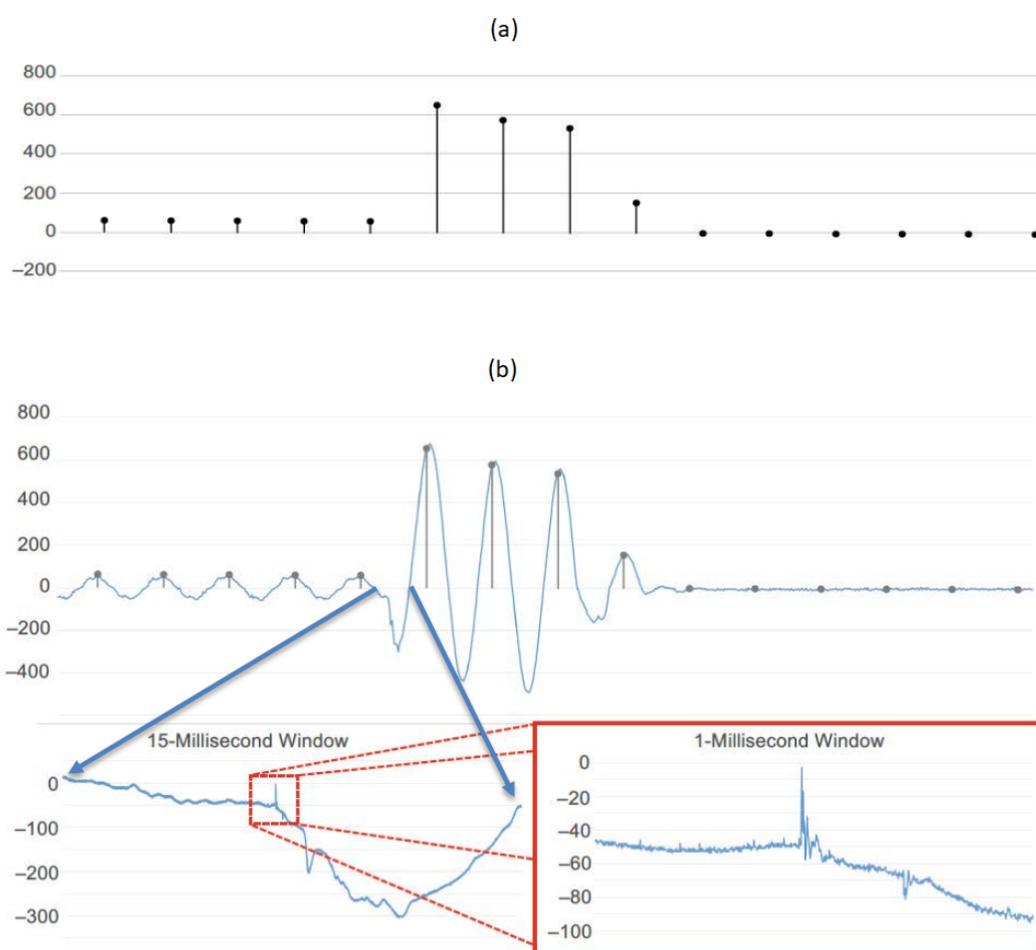
## 2.5 POW

Para os dispositivos de medição, a PMU que opera com sincrofasores realiza a coleta dos valores estimando a magnitude e o ângulo dos fasores desejados, a partir da amostragem de tensão e nas formas de onda de corrente elétrica, seguido de filtragem e processamento dos sinais obtidos, processo que garante taxa de amostragem na ordem de 60 pontos medidos por segundo. Por sua vez, o princípio POW retira amostras do sinal analógico recebido, usualmente ondas senoidais quando se trata de grandezas elétricas em corrente alternada, e discretiza a informação em valores digitais sequenciais através de um Conversor Analógico Digital (ADC). A taxa de amostragem dessa técnica pode ser altamente superior às taxas obtidas por sistemas de sincrofasores, geralmente de 256 até um milhão de amostras por segundo. A [Figura 11](#) exibe os resultados de leituras obtidas por PMU e metodologia POW, a fim de comparar a resolução das duas leituras para um mesmo evento. O sinal digital resultante, ou POW, contém a informação de amplitude do sinal analógico (corrente ou tensão) no tempo com mínima filtragem, podendo ser utilizado em técnicas de reconstrução de sinal contínuo ([HENRIQUE, 2021](#)) ([NASPI, 2020](#)) ([KOVALENKO et al., 2020](#)).

Além dos instrumentos de medição, dispositivos de proteção e atuadores também têm sua aplicação em campo e se beneficiam dos sinais POW. Dentre esses, os relés digitais se destacam pela alta taxa de chaveamento, em torno de um milhão de amostras por segundo em alguns modelos comerciais, possibilitando monitoramento rigoroso das condições de falha e implementação de mecanismos de proteção de ação rápida. Os disjuntores de comutação controlada, como J. A. Jardini *et al.* (2008) expõem, permitem que sejam realizadas manobras em sistemas elétricos de potência de forma mais segura e controlada, como energização e desligamento de linhas de alta tensão e de transformadores rebaixadores, devido à comutação em pontos específicos da forma de onda.

Com o avanço do desenvolvimento do método e soluções comerciais, a implementação de POW para monitoramento do setor elétrico tem expandido de forma acelerada. Uma gama de métodos de avaliação e controle estão sendo desenvolvidas, que incluem técnicas de identificação de transitórios em alta precisão, ampliação de resolução, sincronismo e compatibilidade com dispositivos de outras arquiteturas. O interesse no avanço dessa técnica não está em tornar os sistemas SCADA e SMFS obsoletos, mas sim os complementar e expandir nas aplicações em sistema elétricos de potência ([HENRIQUE, 2021](#)) ([NASPI, 2020](#)).

Figura 11 – (a) Medição PMU a 30 amostras por segundo (b) Medição POW do mesmo evento a 1 milhão de amostras por segundo.



Fonte: Adaptado de (NASPI, 2020).

### 3 Estrutura do Projeto

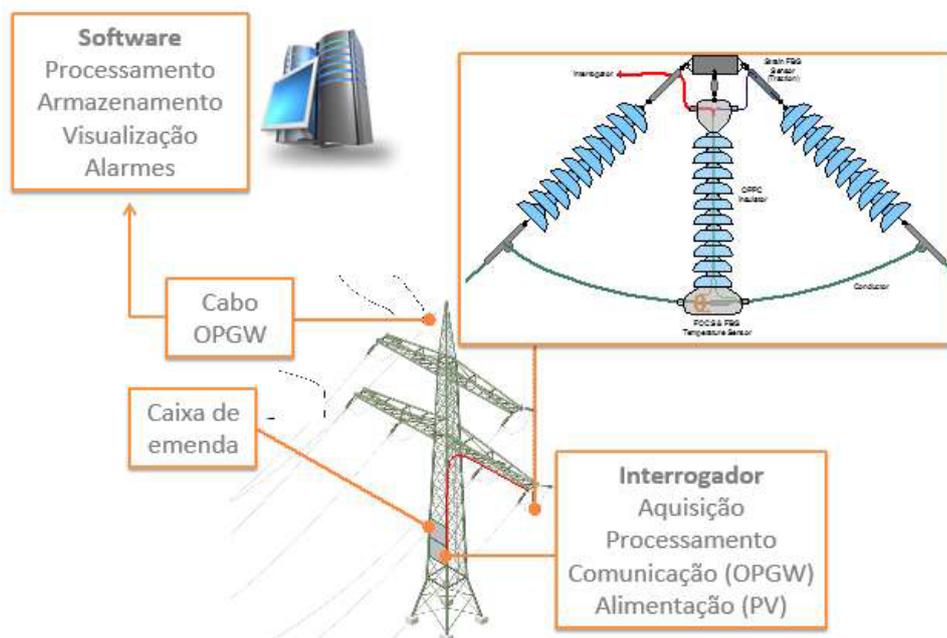
Este capítulo apresenta a estrutura da Solução TECCON de Monitoramento em Tempo Real, que teve sua origem no projeto de pesquisa e desenvolvimento TECCON II (Tecnologia de Sensores em Fibras Ópticas para Supervisão, Controle e Proteção de Sistemas de Energia Elétrica), do INESC P&D Brasil, INESC TEC e TBE (Transmissora Brasileira de Energia, S.A.) em parceria com múltiplas universidades brasileiras, que incluem a Universidade Federal de Campina Grande, Universidade Federal do Pará, Universidade Federal de Santa Catarina, Universidade Estadual de Santa Catarina, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Universidade Federal de Itajubá e Universidade Estadual de Campinas. O objetivo do projeto é aumentar a eficiência, confiabilidade e segurança de linhas de transmissão implementando sensores baseados em fibra ótica. Pela sua característica multidisciplinar, o projeto contou com pesquisadores de várias áreas, como sistemas de potência, comunicações, computação, fotônica, instrumentação, gestão, entre outras. O projeto foi lançado ao final de 2015 e teve a implementação em campo da solução desenvolvida em 2020 (TECCON, 2020).

A Solução TECCON consiste em duas dimensões, a primeira referente a um isolador polimérico instrumentalizado, contendo sensores óticos para medição de corrente elétrica, temperatura e tração no condutor. A outra dimensão do projeto é um sistema de aquisição de dados e supervisão, capaz de processar o resultado das medições e expor informações para o operador através de interfaces gráficas intuitivas. Atualmente, o TECCON está instalado em uma das torres da linha de transmissão de 230 kV situada no município de Abdon Batista, no estado de Santa Catarina. A Figura 12 sintetiza a estrutura da solução.

O isolador polimérico de classe de isolamento de 230 kV é composto de sensores óticos para medição de corrente elétrica, temperatura nos condutores e tração mecânica da ancoragem. Portanto, os dados das medições são obtidos localmente e transmitidos através de cabos *Optical Ground Wire* (OPGW) até o Centro de Controle e Gestão da Rede (CCGR). O conjunto interrogador, localizado próximo aos pés da torre, centraliza e gerencia os módulos de aquisição e processamento do sinal, assim como os canais de comunicação e alimentação (TECCON, 2020). A Figura 13 apresenta os blocos principais e como se dão suas interligações.

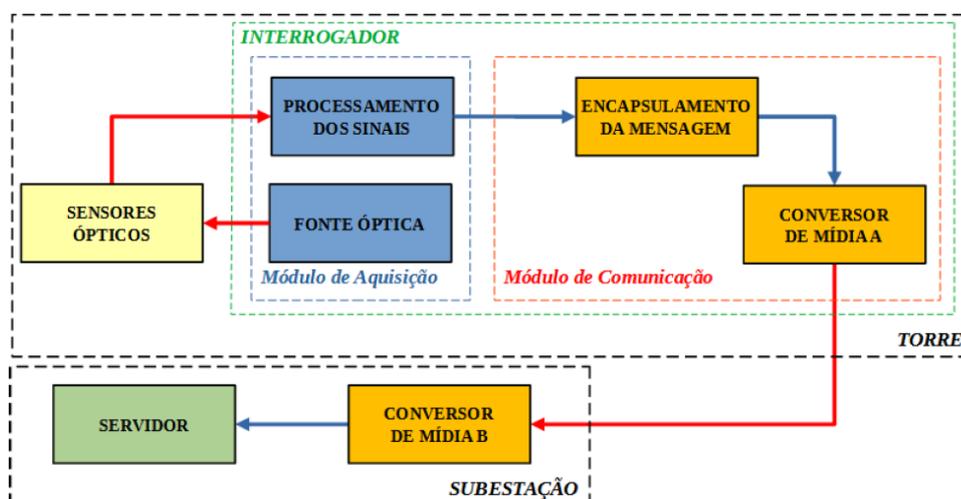
O sensor ótico de corrente utilizado é o sensor cristal *Rare-earth Iron Garnet* (RIG), do tipo *bulk*, que utiliza o efeito Faraday através do enrolamento de fibra sobre o condutor para seu funcionamento, visto em maior detalhe na seção 2.1.2 deste trabalho. O comprimento de onda central de operação é 1550 nm para temperaturas entre -5 °C e 70 °C, a uma fonte ótica de potência elétrica  $\leq 500$  mW (HENRIQUE, 2021). O sen-

Figura 12 – Estrutura da Solução TECCON.



Fonte: Adaptado de (TECCON, 2020).

Figura 13 – Diagrama de blocos da Solução TECCON.



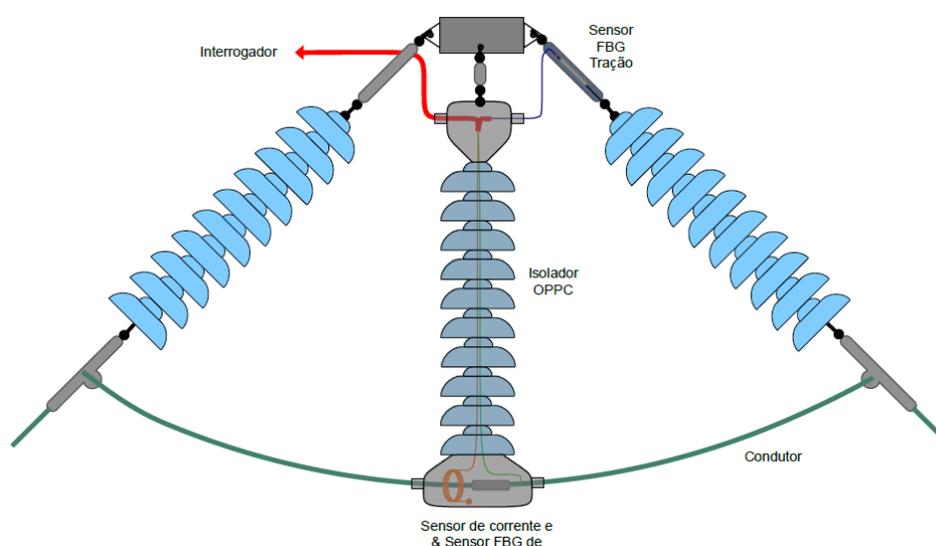
Fonte: Adaptado de (TECCON, 2020).

o sensor é integrado com o Cristal RIG, onde a interrogação se dá com a polarização da luz a 45° para cada um dos dois eixos do divisor de feixe polarizador, *Polarizing Beamsplitter* (PBS), conferindo a configuração polarimétrica em quadratura da interrogação, resultando nos sinais  $S_1$  e  $S_2$  em oposição de fase. A configuração permite alta sensibilidade para rotação do plano de polarização, cujas variações são proporcionais à magnitude de corrente elétrica no condutor.

Os sensores de temperatura e tração são baseados em sensores de Bragg, que utilizam princípios de reflexão em fibra ótica já discutidos na seção 2.2.2, mas que, em resumo, retornam um feixe de luz de banda extremamente estreita de acordo com a

corrugosidade da fibra, característica que varia com a temperatura e/ou comprimento do material, sendo assim possível associar dado comprimento de onda à temperatura ou à tração mecânica local (ROBL, 2020). Como o papel dos sensores de corrente e temperatura é monitorar as grandezas correspondentes no condutor da linha, estes foram instalados embebidos no isolador, próximo à passagem da linha. O sensor de tração mede a deformação mecânica da ancoragem do isolador à torre, logo foi dimensionado para esse posicionamento. A Figura 14 permite visualizar a disposição dos sensores no isolador polimérico.

Figura 14 – Esquemático do isolador polimérico e sensores óticos.

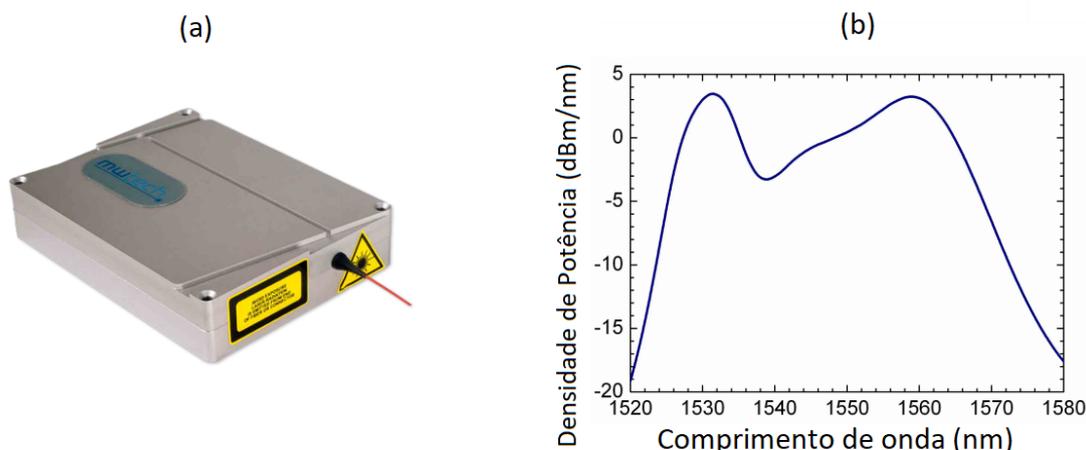


Fonte: (TECCON, 2020).

A fonte ótica utilizada é uma fonte ASE de banda larga de baixo ruído, modelo BBS-C, fabricada pela MWTechnologies, LTDA. A fonte emite luz totalmente despolariada, condição necessária para esta aplicação, tendo em vista que a informação obtida pelos sensores é traduzida em rotação do ângulo de polarização (polarimétrica). O espectro luminoso emitido é na banda C (1525 – 1570 nm). Como o espectro é altamente amplo para as aplicações, o sinal luminoso é repartido entre as aplicações utilizando multiplexação em vários canais, permitindo que cada sensor opere na sua faixa de comprimentos de onda concedida a ele, sem risco de interferência com os demais. A estabilidade de potência ao longo do espectro gerado também é altamente vantajoso, garantindo que não haverá instrumentos beneficiados ou prejudicados por um determinado canal. A fonte faz parte do conjunto interrogador, posicionado em um painel próximo ao solo, na ferragem da torre. A Figura 15 mostra a fonte ASE e seu espectro de comprimentos de onda.

No conjunto interrogador existe a unidade de aquisição e processamento de sinais opto-elétricos, que consiste de eletrônica desenvolvida para captação da informação ótica emitida dos sensores, convertê-la em sinais elétricos para processamento e e

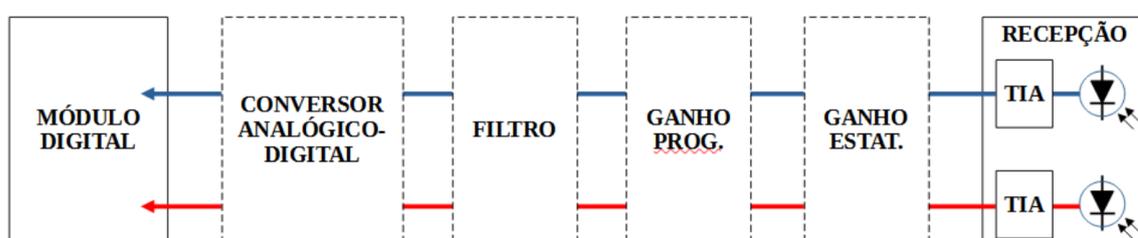
Figura 15 – (a) Fonte ASE BBS-C (b) Espectro da fonte ASE BBS-C



Fonte: Adaptado de (MWTECH, s.d.).

encapsulamento dos dados em pacotes de redes, transmitidos até a CCGR via cabo OPGW. A transdução ótica-elétrica é dada através de fotodetectores, que convertem a informação contida na polarização da luz recebida em sinal analógico. Cada grandeza monitorada recebe um par de fotodetectores, um para cada sinal  $S_1$  e  $S_2$  em oposição de fase. A saída dos fotodetectores se dá em canais isolados da placa eletrônica desenvolvida para a Solução, responsável por grande parte do processamento e transmissão dos dados. A partir da recepção do sinal analógico, a placa eletrônica é responsável pelo condicionamento do mesmo, iniciando com a primeira amplificação através de um amplificador de transimpedância (TIA), seguida pelo ajuste do ganho estático e ganho controlado (programável) do sinal, uma etapa de filtragem passa-baixa (*anti-aliasing*) e concluindo na conversão analógico-digital do sinal, antes de ser realizado o pré-processamento no módulo digital (HENRIQUE, 2021). A Figura 16 representa a sequência de etapas após recepção via fotodetectores.

Figura 16 – Diagrama do condicionamento do sinal na placa eletrônica.



Fonte: (HENRIQUE, 2021).

Além dos canais para a medição de corrente, temperatura do condutor e tração, é integrado ao sistema uma Estação Meteorológica (EM), responsável pelo monitoramento das condições ambientais, que incluem a temperatura ambiente, umidade, pressão, intensidade e direção do vento. A supervisão das condições meteorológicas

em tempo real é de alta importância para proteção de linhas de alta tensão. A EM é sincronizada via sinal GPS, conferindo à informação etiquetas temporais. A taxa de amostragem da EM é de uma amostra por segundo, frequente o suficiente dada a estabilidade das grandezas que monitora. A taxa de amostragem de cada uma das medições pode ser vista na [Tabela 1](#). Apesar da alta capacidade dos sensores RIG e de Bragg de atenderem altas taxas de amostragem, a placa eletrônica possui limitações que tiveram forte influência sobre a redução da velocidade para adquirir leituras.

Tabela 1 – Taxa de amostragem de cada sensor.

<b>Grandeza física</b>	<b>Amostras por segundo</b>
Corrente	15360
Temperatura	120
Tração	120
Meteorológicas	1

Fonte: [\(TECCON, 2020\)](#).

Após a recepção, condicionamento e digitalização, os sinais das medições são processados no módulo de comunicação da placa eletrônica, onde ocorre o encapsulamento da mensagem, formatada no modelo descrito pelo protocolo *Sampled Values* (IEC 61850), padrão internacional para comunicação de grandezas elétricas em sistemas de transmissão em tempo real. O próximo passo é a comunicação, no qual conversores de mídia *Fast Ethernet* e *Gigabit Ethernet* transmitem os pacotes de rede a taxas de 10 e 1000 Mbps, respectivamente. As mensagens são recebidas pela central de controle, onde são armazenadas em um banco de dados, podendo ser acessados via web para visualização através de uma interface gráfica desenvolvida para o projeto.

## 4 Metodologia

Na qualificação de doutorado de Clayrton M. Henrique (2021), o autor descreve, de forma aprofundada, a infraestrutura da Solução TECCON e as metodologias de funcionamento envolvidas na aquisição de medidas físicas através dos sensores óticos, dos quais é destacado o sensor de corrente elétrica, enfoque deste trabalho. Apresenta o detalhamento do processo de desenvolvimento, que inclui a sequência de etapas de implementação para cada grandeza monitorada pelo sistema. O autor encerra com o estudo de calibração das medições, descrevendo a estrutura que simula o funcionamento em campo e a metodologia dos ensaios realizados para determinar as curvas de resposta dos diferentes sensores implementados na solução. O trabalho encerra com a exposição dos resultados obtidos nos ensaios e comentários sobre oportunidades futuras para testes dos diferentes sensores.

A aquisição de uma fonte ótica alternativa para o projeto, um laser semiconductor DFB, motivou os pesquisadores a entenderem os efeitos da reconfiguração da Solução TECCON para comportar o novo elemento. Neste contexto, foram realizados ensaios adicionais dos sensores óticos de corrente, para complementar o conhecimento obtido pelo trabalho de Clayrton M. Henrique e estabelecer bases de comparação de diferentes arranjos instrumentais possíveis para a solução, almejando determinar uma configuração ótima para a unidade de monitoramento de corrente elétrica em tempo real.

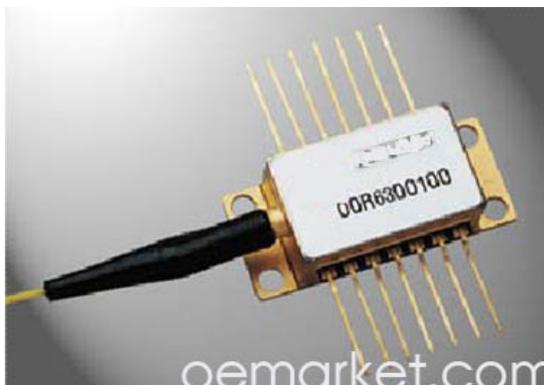
Neste capítulo, serão detalhadas a montagem do *setup* físico (bancada experimental), a metodologia de medição de corrente e abordagem dos ensaios de calibração e sensibilidade. A exposição dos resultados, assim como a discussão a respeito dos mesmos, são realizadas no capítulo posterior.

### 4.1 Setup

A configuração da bancada é análoga àquela adotada por Clayrton M. Henrique, conforme exposto em sua qualificação de doutorado, cujo objetivo é simular uma linha de transmissão em laboratório. No entanto, ao invés de realizar os ensaios com a fonte ASE de banda larga, incorporou-se a nova fonte adquirida para o projeto, um laser semiconductor DFB da fabricante **oeMarket**. Esta emite um feixe de luz despolarizada com espectro altamente estreito a alta potência, com comprimento de onda centrado em 1550 nm. A [Figura 17](#) traz uma imagem da fonte. Esta foi montada sobre um *driver* de diodo laser, da fabricante **MWTechnologies**, um dispositivo para acionamento integrado da fonte, contendo IHM para ajustes manuais de alimentação, regulando,

assim, a potência luminosa fornecida. Uma imagem do *driver* é vista na [Figura 18](#).

Figura 17 – Fonte ótica laser DFB utilizada.



Fonte: (OEMARKET, 2022)

Figura 18 – *Driver* de diodo laser utilizado com a fonte laser DFB.

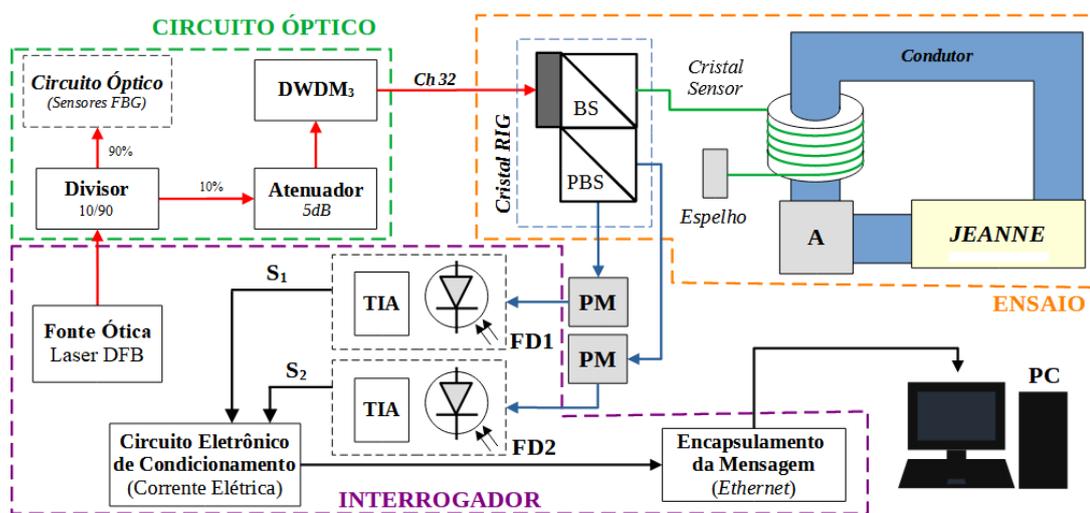


Fonte: (MWTECH, s.d.)

Para adequar a estrutura estabelecida à fonte laser DFB, também foram alterados elementos de condicionamento do sinal luminoso após a emissão da fonte. Ainda é mantido o divisor de potência para emitir a parcela de luz para os sensores de temperatura e tração mecânica, enquanto 10% da potência é dedicada para o circuito de medição de corrente. Os atenuadores eram variados de acordo com os ensaios, para se atingir maior refinamento no controle da potência de saída, entretanto, os mais utilizados foram os de 3 dB, 5 dB e 10 dB. Foi utilizado *Dense Wavelength Division Multiplexing* (DWDM) no *setup* porque, por mais que aparente ser redundante para um feixe de banda tão estreita, a seleção de canal centrado em 1550 nm permite a filtragem dos comprimentos de onda das bandas laterais. A configuração da bancada pode ser vista na [Figura 19](#).

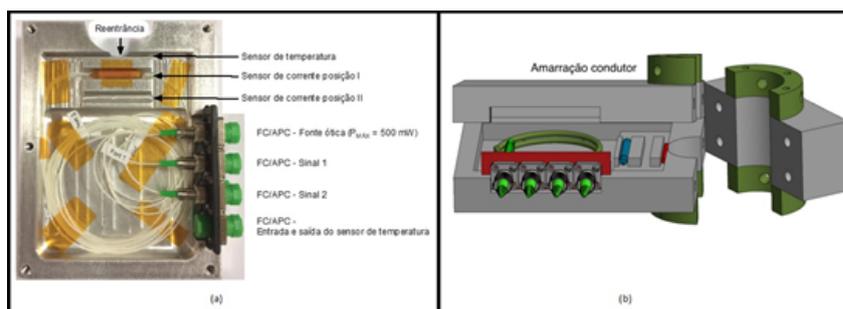
A corrente fluente no condutor induz campo magnético que altera o ângulo do plano de polarização dos sinais, conforme descreve o efeito Faraday. Após reflexão ao final da fibra, os sinais atravessam o PBS, o qual emite os dois sinais  $S_1$  e  $S_2$  em quadratura

Figura 19 – Diagrama de representação do *setup* para os ensaios.



Fonte: Adaptado de (HENRIQUE, 2021)

Figura 20 – Encapsulamento dos sensores óticos para adaptação ao condutor.



Fonte: (TECCON, 2020)

para os dois fotodetectores,  $FD_1$  e  $FD_2$ . A potência recebida pelos fotodetectores é aferida pelo medidor de potência ótica, com comprimento de onda centrado em 1550 nm. A atenuação total do circuito ótico varia entre 10 dB a 15 dB, dependendo do arranjo de atenuadores selecionados.

Os fotodetectores convertem o sinal ótico em sinal elétrico nos canais de entrada da placa eletrônica. O projeto possui três placas TECCON desenvolvidas, nomeadas a partir do endereço MAC de cada uma. A placa BC está operando em campo, enquanto as outras duas, 6B e 6C, estão disponíveis para experimentos no laboratório. Optou-se por utilizar a placa 6C nesta configuração, por ser, historicamente, a de pior desempenho de calibração. A Figura 22 mostra a placa eletrônica utilizada nos experimentos. Um computador ligado à placa via cabo de rede permite a captura dos pacotes com os dados das leituras de corrente.

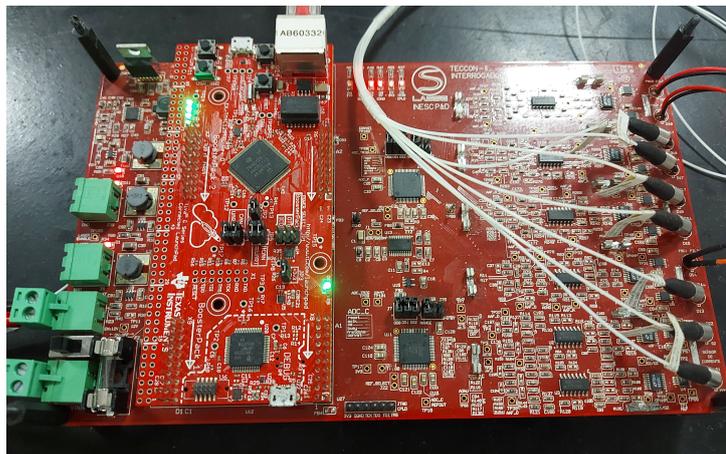
Com o *setup* completo, que pode ser visto na Figura 23, é possível realizar a medição de corrente via sensoriamento ótico em tempo real, simulando a operação da Solução TECCON em uma linha de transmissão real.

Figura 21 – Fonte de corrente Jeanne.



Fonte: (TECCON, 2020)

Figura 22 – Placa eletrônica 6C.



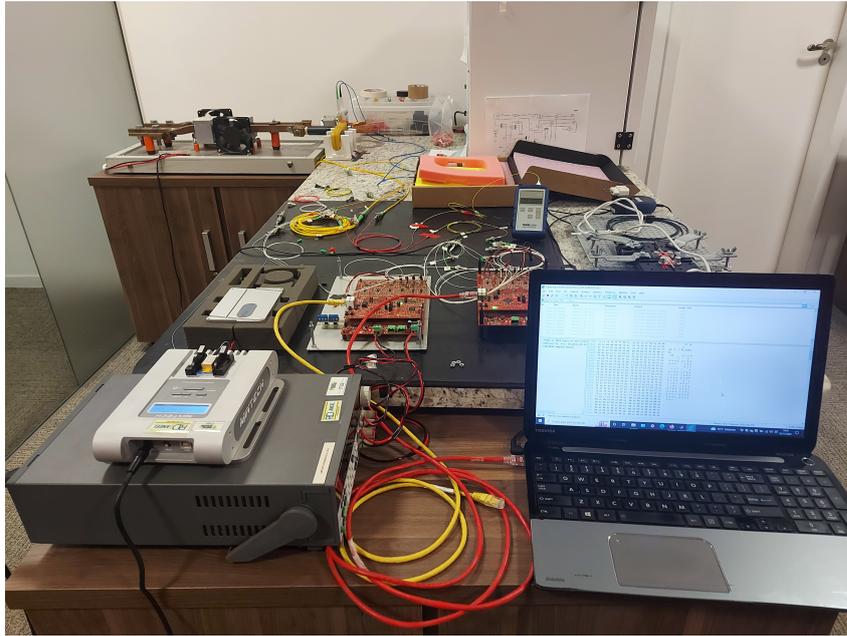
Fonte: Autor.

## 4.2 Medição de corrente

Para medição da corrente a partir do sensoriamento óptico, Clayrton M. Henrique (2021) define a relação entre a magnitude da corrente elétrica e os sinais  $S_1$  e  $S_2$ , que chegam à placa eletrônica via transdução dos fotodetectores e amplificação do TIA. A [Equação 4.1](#) e a [Equação 4.2](#) definem essa relação para  $S_1$  e  $S_2$ , respectivamente. A [Equação 4.3](#) e a [Equação 4.4](#) evidenciam as parcelas DC e AC dos sinais.  $\theta_F$  é o ângulo de polarização da luz, cujo modelo que o descreve é a [Equação 4.5](#), devido ao efeito Faraday nos sensores.

$$S_1 = S_{1DC} + S_{1AC} = k[1 + \sin(4\theta_F)] \quad (4.1)$$

$$S_2 = S_{2DC} + S_{2AC} = k[1 - \sin(4\theta_F)] \quad (4.2)$$

Figura 23 – Vista da bancada com *setup* completo.

Fonte: Autor.

$$S_{1DC} = S_{2DC} = k \quad (4.3)$$

$$S_{2AC} = S_{2AC} = \sin(4\theta_F) \quad (4.4)$$

$$\theta_F = \mu V I \quad (4.5)$$

onde:

$k$  : Constante DC.

$\theta_F$  : Ângulo de polarização da luz;

$\mu$  : Permeabilidade relativa do meio;

$V$  : Constante de Verdet.

$I$  : Corrente que flui no condutor.

Dessa maneira, o valor da corrente elétrica no condutor é dada pela [Equação 4.6](#) e [Equação 4.7](#) (HENRIQUE, 2021).

$$S = \frac{S_1 - S_2}{S_1 + S_2} = \sin(4\theta_F) \quad (4.6)$$

$$S = \sin(\mu V I)$$

$$I = \frac{\sin^{-1}(S)}{4\mu V} \quad (4.7)$$

Após o condicionamento do sinal e antes do processamento digital, recuperam-se dois sinais,  $I^{G_1}$  e  $I^{G_2}$ , que representam a corrente elétrica no condutor e são obtidos da mesma relação descrita na [Equação 4.7](#) aplicada aos sinais condicionados em

quadratura. O sinal  $I^{G_1}$  tem capacidade de exprimir valores de 100A a 100kA, enquanto  $I^{G_2}$  representa valores inferiores a menor taxa de ruído de quantização que o primeiro. A corrente nominal do sistema e os ganhos DC dos sinais são determinados com base nos valores de tensão convertida pelos fotodetectores e potência ótica do circuito (HENRIQUE, 2021).

### 4.3 Ensaios

A fim de estudar os efeitos da sensibilidade do sistema à variação de potência ótica e determinar a curva de calibração para sensoriamento de corrente, foram realizados uma série de ensaios sobre a bancada experimental. Para correlacionar as grandezas corrente elétrica no condutor, potência ótica e resultado da transdução ( $S_1$  e  $S_2$  em tensão elétrica), essas três medidas foram monitoradas durante os ensaios. Com a determinação de várias coordenadas tridimensionais (corrente, potência, tensão), será possível inferir a qualidade de desempenho do arranjo instrumental e como deve ser dada sua calibração, para atingir precisão das medições. O procedimento implementado para condução dos ensaios será descrito no restante deste subcapítulo.

Os valores de corrente utilizados para os ensaios foram 10, 25, 50 e 100A. A escolha destes valores se deu pelo fato de representarem a pior situação para qualidade da medição, os valores mínimos. Em operação usual, linhas de 230kV operam entre 200A e 700A, podendo ter flutuações variantes com a demanda e carregamento. Para um mesmo valor de potência ótica, é sabido que a resposta do sensor RIG é (2021) a partir de seus experimentos. Logo, é possível inferir o perfil linear de resposta mesmo para valores superiores a 100A, dada calibração apropriada do sistema.

Para cada valor de corrente, foram realizados ensaios para diferentes valores de potência ótica na entrada de um dos fotodetectores. Conforme o resultados expostos por Clayrton M. Henrique (2021), o sistema responde melhor a um intervalo de valores de potência ótica, denominada faixa sensível ou faixa ótima de operação. Para valores muito baixos de potência, a tensão condicionada na placa eletrônica é reduzida ao ponto de decair abaixo do limiar de ruído, determinado como o limite de tensão de resposta para corrente igual a 0A, resultante de ruído. Já valores altos demais de potência ótica comprometem o funcionamento do sensor RIG, em torno de -25 dBm (HENRIQUE, 2021). Foram selecionados uma ampla quantidade de valores entre -32 dBm e -26 dBm para cada valor de corrente medida, com o objetivo de traçar o perfil de sensibilidade e identificar pontos de operação ótimos. Os baixos valores de corrente também favorecem essa busca, por terem faixa sensível ainda mais estreita.

Com o *setup* da bancada montado, a rotina dos ensaios se iniciava com a energização dos dispositivos, concedendo tempo hábil para todos entrarem em regime de operação permanente. Em seguida, era estabelecida a corrente no condutor, variando

a alimentação da Jeanne pelo regulador de tensão, monitorando o valor da corrente pelo alicate amperímetro, fixado para medição no condutor. O controle de injeção de potência da fonte ótica foi regulado a partir da leitura realizada pelo medidor de potência ótica, posicionado para medição na entrada de um dos fotodetectores,  $FD_1$ .

Com a corrente e potência ótica fixadas nos valores desejados, eram realizadas as capturas das leituras enviadas pela placa 6C. A conexão da placa ao computador era feita via cabo de rede RJ45, padrão Ethernet, e a captura dos pacotes utilizando o software **Wireshark** versão v3.2.6-0 para Windows 10 (64 bits), software dedicado para análise de rede e organização de protocolos. Eram realizadas sete capturas sequenciais para um dado valor de corrente e potência ótica, sendo que cada arquivo capturado (extensão *.pcap*) armazena 3000 pacotes *Sampled Values*, protocolo de encapsulamento de mensagem utilizado nos sistemas de energia elétrica. A fim de manter controle dos ensaios, os pacotes eram nomeados seguindo o padrão visto na **Tabela 2** e exemplo dado a seguir.

Tabela 2 – Padrão de nomenclatura dos arquivos de captura.

(a)_(b)_(c)_(d)_(e)_(f)_(g)(h)_(i).(j)	
(a)	identificação da placa
(b)	data da captura
(c)	identificação do projeto
(d)	fonte ótica utilizada
(e)	potência ótica na entrada de $FD_1$
(f)	grandeza calibrada
(g)	magnitude da grandeza
(h)	unidade da grandeza
(i)	número do arquivo
(j)	extensão do arquivo

Fonte: Autor.

Exemplo: 6C\_221101\_uTECCON2\_DFB\_-26.1 dBm\_corrente\_100.0A\_3.pcap

Em posse dos pacotes transmitidos pela placa, duas rotinas implementadas no software **MATLAB** são responsáveis pelo processamento de dados. A primeira é encarregada de sintetizar a informação contida nos arquivos para o usuário, na qual se aponta a pasta onde foram armazenados os sete arquivos, de onde são decodificados e a média dos valores de tensão de cada arquivo são postos para visualização. A segunda rotina tem a função de organizar a resposta de sensibilidade dado um valor de corrente elétrica. Inicialmente, faz a média de tensão por arquivo, descarta os dois casos de maior desvio padrão e armazena a média do valor dos cinco remanescentes, realizando este procedimento através do controle via nomes dos arquivos, dos quais se tem informação sobre o valor de potência ótica e corrente medidos. A rotina encerra com a exposição dos valores médios associados a cada grupo de cinco arqui-

vos, assim como um gráfico da relação tensão  $\times$  potência ótica para o mesmo valor de corrente, resposta denominada "sensibilidade do sistema".

No próximo capítulo, os resultados obtidos estão expostos, assim como comentários e comparações envolvendo os mesmos.

## 5 Resultados

Após a conclusão de todos os ensaios, foram obtidos os valores médios de tensão nos canais de entrada da placa 6C para diferentes valores de potência ótica definidos e corrente no condutor.

Considerando a 100A de corrente no condutor *BlueJay*, foram realizados ensaios para 25 diferentes magnitudes de potência ótica definidas, cujos resultados podem ser vistos na [Tabela 3](#). Para realizar a análise de sensibilidade do sistema, os dados colhidos foram dispostos em um gráfico para correlacionar a resposta à variação de potência ótica, como foi feito nos ensaios utilizando a fonte ASE. A [Figura 24](#) traz uma comparação direta entre as curvas de resposta obtidas para cada fonte utilizada a 100 A. A [Figura 25](#) mostra as curvas de resposta dos ensaios com a fonte ASE para as diferentes placas eletrônicas a 100 A.

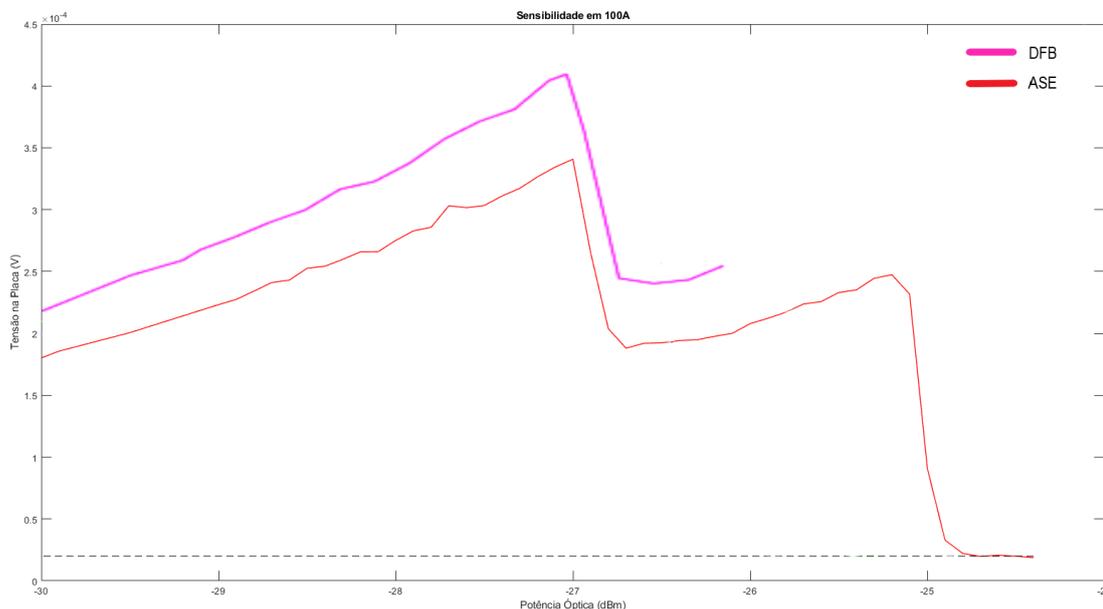
Tabela 3 – Média dos valores de resposta da placa eletrônica 6C por potência ótica definida em nível de corrente 100A (@1550nm).

$P_{def}(\text{dBm})$	$\bar{V}_{pcb}(\mu\text{V})$	$P_{def}(\text{dBm})$	$\bar{V}_{pcb}(\mu\text{V})$
-26,1	242,68	-28,5	291,12
-26,3	230,23	-28,7	280,42
-26,5	227,33	-28,9	267,97
-26,7	231,63	-29,1	256,51
-26,9	359,71	-29,2	247,47
-27,0	409,61	-29,5	234,19
-27,1	404,29	-30,0	203,28
-27,3	378,77	-30,4	192,00
-27,5	368,27	-31,0	167,37
-27,7	353,18	-31,5	147,19
-27,9	332,08	-32,0	134,41
-28,1	316,06	-32,4	121,68
-28,3	309,24		

Fonte: Autor.

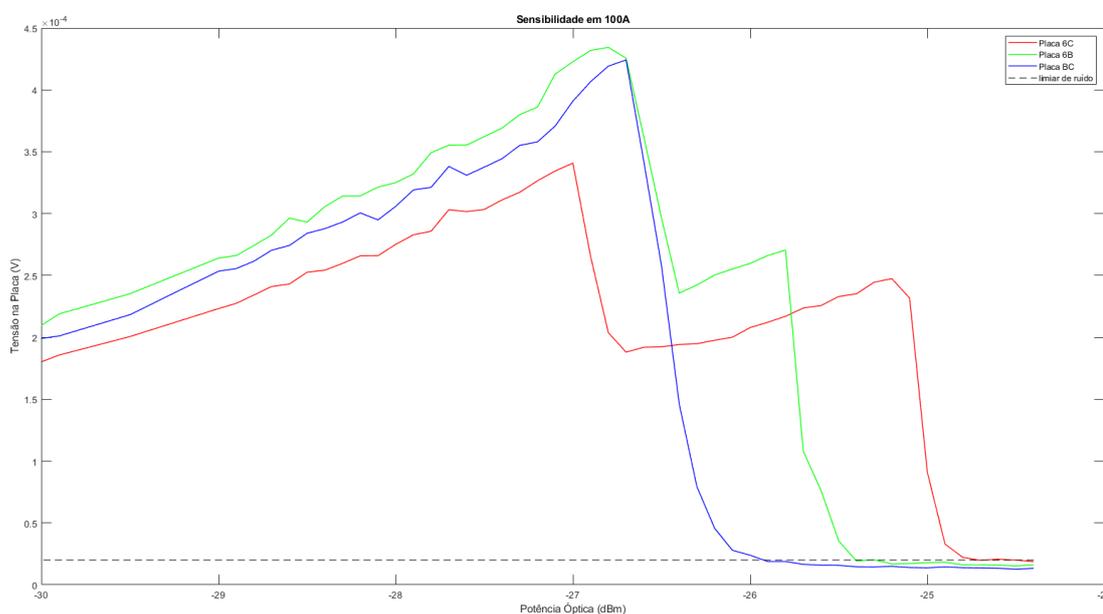
Na [Figura 25](#), é possível notar como a placa 6C é aquela de pior performance, apresentando pico de tensão reduzido em relação às demais, em cerca de  $340 \mu\text{V}$ , que se atingiu à potência ótica no fotodetector  $FD_1$  próxima de  $-27 \text{ dBm}$ . Para os ensaios utilizando a fonte laser DFB, o pico de resposta da placa 6C também ocorreu no mesmo valor de potência ótica, entretanto, nota-se aumento do nível de tensão convertida, alcançando valores próximos de  $410 \mu\text{V}$ , um ganho de cerca de  $70 \mu\text{V}$  em comparação ao obtido com a fonte ASE. Este comportamento se observa não somente nos máximos de tensão, porém como um ganho presente em toda curva de resposta da placa, preservando o perfil de crescimento do nível de tensão à partir dos

Figura 24 – Curvas de resposta por potência ótica para fonte ASE e DFB utilizando a placa 6C, a corrente de 100A



Fonte: Autor.

Figura 25 – Curvas de resposta por potência ótica para fonte ASE nas diferentes placas eletrônicas disponíveis, a corrente de 100A



Fonte: (HENRIQUE, 2021).

valores de potência ótica mais reduzidos, seguido de queda abrupta à partir de -27 dBm e retomada do aumento até valores próximos de -25 dBm, o limiar superior de operação do sensor RIG.

A linha pontilhada delimita o limiar de ruído, fixado em 20  $\mu$ V. Este valor foi determinado após ensaios de circuito aberto, para que a corrente no condutor é nula, onde se verificou a resposta de tensão das placas em cerca de 15  $\mu$ V, conferindo o limite de

sensibilidade do sistema.

Os testes não continuaram para valores de potência acima de -26 dBm para corrente de 100 A porque o intervalo ótimo de operação já é delimitado antes de -27 dBm, ponto de queda abrupta da resposta. O segundo pico, conforme visto na [Figura 25](#), ocorre próximo de -25,2 dBm, mas não é uma região de operação estável e que se repete da mesma maneira para as demais placas eletrônicas do projeto.

O ganho de tensão observado nos ensaios utilizando a fonte laser DFB, decorrente da alta densidade de potência centrada em 1550 nm, traz benefícios na resolução da medição, conferindo maior precisão nos valores de corrente aferidos. Adicionalmente, não foram detectadas anomalias na resposta da sistema, dado perfil semelhante àquele obtido nos ensaios com a fonte ASE.

Para corrente no condutor de 50A, as medições foram colhidas para 16 valores de potência ótica. Os resultados alcançados e a curva de resposta do sistema estão expostos na [Tabela 4](#) e [Figura 26](#), respectivamente. Nota-se a permanência do perfil de resposta obtido nas leituras realizadas para 100 A.

Tabela 4 – Média dos valores de resposta da placa eletrônica 6C por potência ótica definida em nível de corrente 50A (@1550nm).

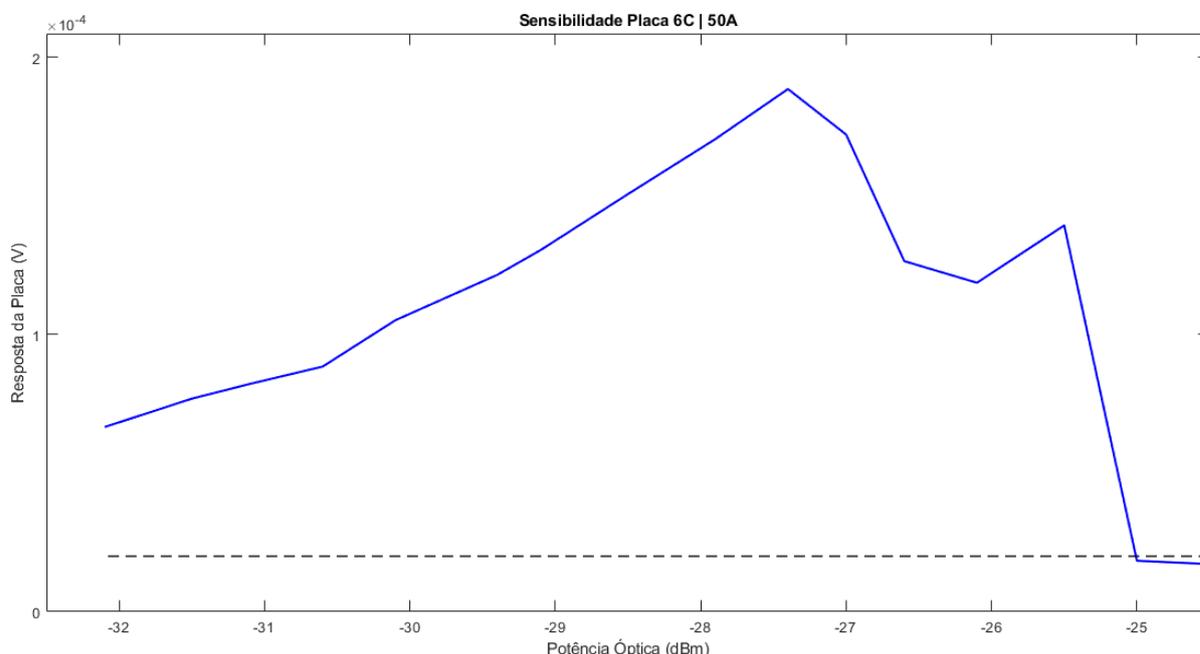
$P_{def}$ (dBm)	$\bar{V}_{pcb}$ ( $\mu$ V)	$P_{def}$ (dBm)	$\bar{V}_{pcb}$ ( $\mu$ V)
-24,5	018,04	-28,5	150,69
-25,0	019,04	-29,1	130,43
-25,5	139,22	-29,4	121,43
-26,1	119,15	-30,1	105,31
-26,6	126,43	-30,6	088,51
-27,0	172,13	-31,1	082,13
-27,4	188,68	-31,5	076,78
-27,9	170,53	-32,1	066,51

Fonte: Autor.

Para corrente no condutor de 25A, as medições foram colhidas para 21 valores de potência ótica. Os resultados alcançados e a curva de resposta do sistema estão expostos na [Tabela 5](#) e [Figura 27](#), respectivamente. Para essas medições, os valores de tensão obtidos se aproximam do limiar de ruído, estabelecido em 20  $\mu$ V, no entanto, o sensor ainda é capaz de prover resposta em polarização da luz para os valores de baixa corrente.

Para corrente no condutor de 10A, as medições foram colhidas para 21 valores de potência ótica. Os resultados alcançados e a curva de resposta do sistema estão expostos na [Tabela 6](#) e [Figura 28](#), respectivamente. Para valores de corrente tão baixa, a magnitude da tensão está abaixo do limiar de ruído em alguns pontos, indicando a sensibilidade dos fotodetectores a cerca de -32 dBm e a mesma queda de resposta do sensor RIG para potência acima de -25 dBm.

Figura 26 – Curvas de resposta por potência ótica para fonte laser DFB na placa 6C, a corrente de 50A.



Fonte: Autor.

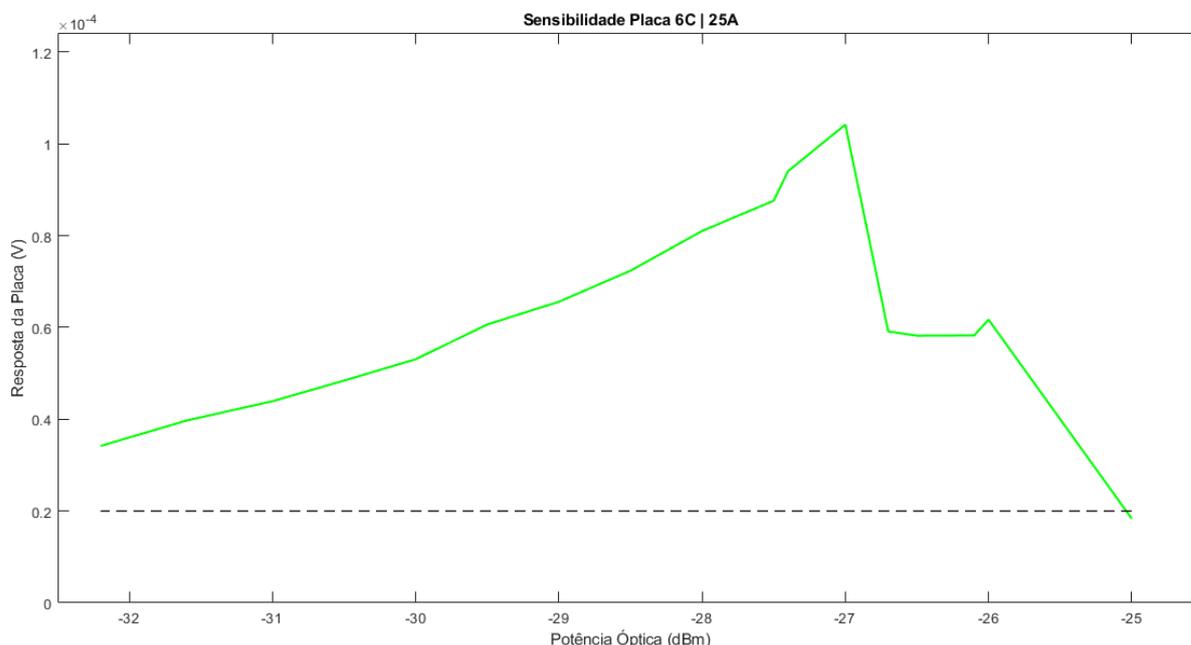
Tabela 5 – Média dos valores de resposta da placa eletrônica 6C por potência ótica definida em nível de corrente 25A (@1550nm).

$P_{def}$ (dBm)	$V_{pcb}$ ( $\mu$ V)	$P_{def}$ (dBm)	$V_{pcb}$ ( $\mu$ V)
-25,0	018,49	-28,5	072,35
-26,0	061,69	-29,0	065,69
-26,1	058,36	-29,5	060,76
-26,5	058,46	-30,0	053,04
-26,7	059,17	-30,5	048,48
-27,0	104,32	-31,0	044,02
-27,4	094,02	-31,6	039,26
-27,5	087,53	-32,2	034,81
-28,0	081,17		

Fonte: Autor.

A **Figura 29** reúne todas as curvas de resposta obtidas em um único gráfico. A faixa ótima de operação é perceptível em todos os exemplos, definida entre -29 e -27 dBm para melhor desempenho. Valores levemente maiores de potência nos fotodetectores  $FD_1$  e  $FD_2$  decaem de forma abrupta, enquanto valores reduzidos ao excesso (abaixo de -31 dBm), não fornecem a melhor medição. Entretanto, enquanto estiver operando na faixa ótima, a configuração confere alta confiabilidade das medições, mesmo para os valores mais baixos de corrente no contexto de linhas de alta tensão, característica importante para monitoramento de manobras de desligamento ou comprometimento da integridade da linha.

Figura 27 – Curvas de resposta por potência ótica para fonte laser DFB na placa 6C, a corrente de 25A.



Fonte: Autor.

Tabela 6 – Média dos valores de resposta da placa eletrônica 6C por potência ótica definida em nível de corrente 10A (@1550nm).

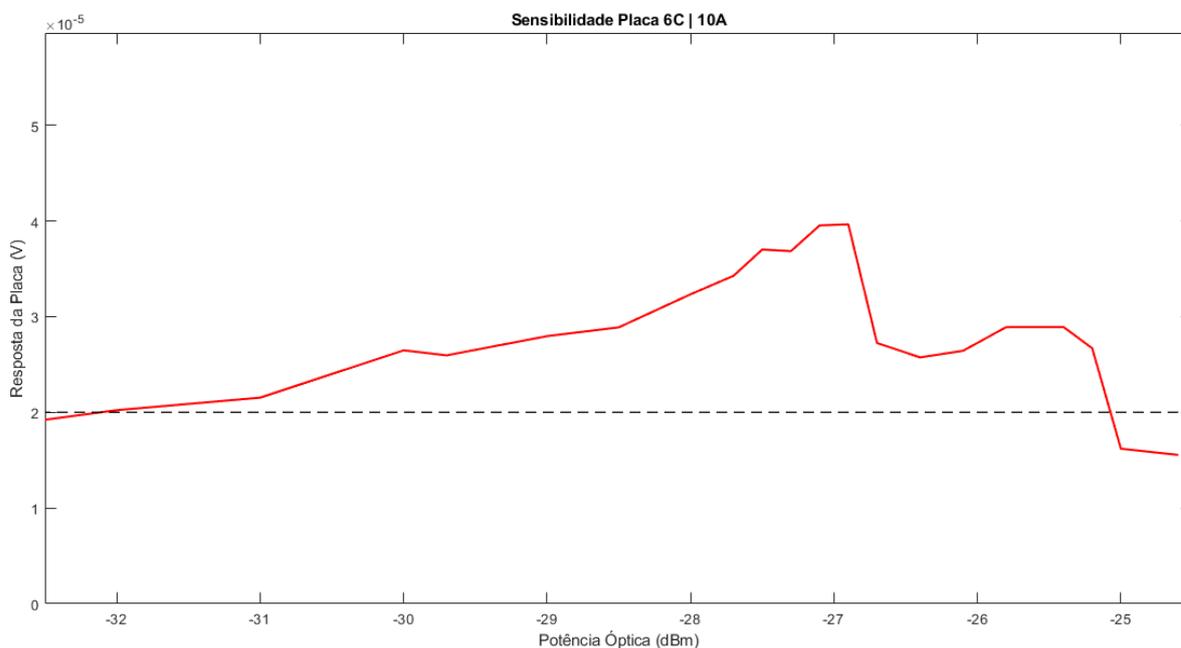
$P_{def}$ (dBm)	$\bar{V}_{pcb}$ ( $\mu$ V)	$P_{def}$ (dBm)	$\bar{V}_{pcb}$ ( $\mu$ V)
-24,6	016,95	-27,5	037,29
-25,0	017,21	-27,7	034,32
-25,2	026,88	-28,0	032,62
-25,4	029,57	-28,5	029,52
-25,8	029,69	-29,0	028,38
-26,1	026,91	-29,7	026,82
-26,4	026,27	-30,0	027,02
-26,7	028,34	-31,0	022,55
-26,9	040,32	-32,0	020,67
-27,1	039,87	-32,5	020,19
-27,3	037,05		

Fonte: Autor.

O gráfico também serve para evidenciar a capacidade de reprodução do perfil das curvas obtidas em diferentes valores de corrente, assim como um primeiro indício da relação linear entre tensão nas placas eletrônicas e corrente no condutor.

A curva de calibração do sensoriamento de corrente é dada pela relação entre corrente no condutor ( $\hat{I}_{ckt}$ ) e valores médios de tensão nas placas eletrônicas ( $\bar{V}_{pcb}$ ). Como foi aludido anteriormente, esta relação para o sensor RIG é aproximadamente linear, característica desejável pela facilidade de controle e refinamento, e que não deve ser

Figura 28 – Curvas de resposta por potência ótica para fonte laser DFB na placa 6C, a corrente de 10A.



Fonte: Autor.

obscurecido durante o funcionamento haja em vista os demais elementos lineares do *setup*. Para obtenção da curva de calibração, foi realizada a regressão linear para medições conduzidas a -27,2 dBm, dispostos na Tabela 7. A relação de calibração para a fonte ASE e para a fonte laser DFB são vistas em Equação 5.1 (HENRIQUE, 2021) e Equação 5.2 respectivamente, assim como o coeficiente de determinação ( $R^2$ ) definido para cada, sendo a corrente dada em A e a tensão em mV.

Tabela 7 – Valores utilizados na regressão linear para determinação da curva de calibração utilizando fonte laser DFB.

Resultado das medições a -27,2 dBm	
Corrente (A)	Média de tensão ( $\mu V$ )
100	404,29
50	172,13
25	104,32
10	39,8

Fonte: Autor.

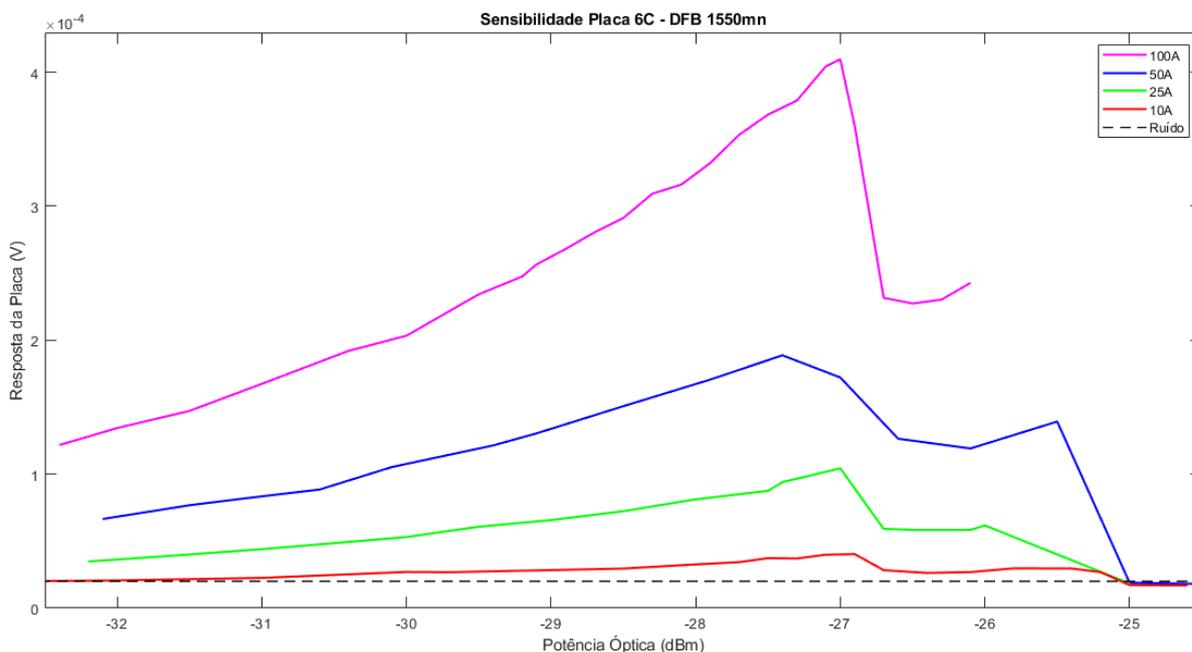
$$\hat{I}_{ckt}^{ASE} = 426,975\bar{V}_{pcb} + 4,25648 \quad (5.1)$$

$$R^2 \leq 99,50$$

$$\hat{I}_{ckt}^{DFB} = 243,130\bar{V}_{pcb} + 2,13038 \quad (5.2)$$

$$R^2 \leq 99,00$$

Figura 29 – Curvas de resposta por potência ótica para fonte laser DFB na placa 6C.



Fonte: Autor.

Conclui-se que, para o mesmo valor de potência recebida pelos fotodetectores, as curvas de calibração necessitam de parâmetros diferentes entre os arranjos com fontes óticas de princípios distintos, contudo, a aproximação linear é coerente para ambos. O uso da fonte laser DFB confere estabilidade na faixa de operação ótima, entre -29 e -27 dBm, e a simplicidade de calibração, dado perfil linear de resposta dos sistema. Se comparada à fonte ASE, a nova fonte proporciona melhor sensibilidade, dado ganho na resposta em tensão da placa eletrônica, permitindo maior confiabilidade e precisão das medições. Esses fatores revelam a fonte laser DFB como uma alternativa plausível à fonte ASE para a Solução TECCON.

## 6 Conclusões

Sensores que utilizam princípios óticos para realizar monitoramento ou medição de grandezas físicas são tecnologias inovadoras promissoras, que continuamente ganham mais espaço em diferentes setores de aplicação, em especial para sensoria-mento de corrente elétrica. Proporcionam uma série de vantagens operacionais, se comparadas às ferramentas convencionais: a redução do volume de material faci-lita a implementação e manutenção de fibra ótica, além de ocupar menos espaço das instalações; a segurança contra saturação magnética garante a estes dispositivos o comportamento linear, favorecendo a exatidão das medições; eliminam o risco de combustão e explosão originária dos circuitos eletricamente ativos. Os sensores de corrente *bulk* ou totalmente em fibra fazem uso do mesmo princípio físico para for-necer medições confiáveis de corrente, além de usufruírem de todas as vantagens práticas da fibra ótica já citadas.

Concorrente a esta tendência, o sistema de transmissão de energia elétrica, um setor historicamente conservador e resistente à renovação de seu instrumental, vive um momento de acelerado desenvolvimento. Destaca-se a ênfase em segurança das linhas e, incidentemente, na mitigação de riscos a operadores e técnicos do setor. Juntamente a esta necessidade, observa-se o crescente interesse de coleta de dados operacionais, que incluem registros de perturbação, acompanhamento das variações de carregamento e vigilância sobre o fluxo de potência. A soma de tais fatores agrega à necessidade de evolução dos meios de monitoramento e controle em tempo real, aplicados aos sistemas elétricos de potência.

Os sistemas SCADA surgiram, inicialmente, como integração de sensoriamento, aquisição e comunicação nos sistemas de transmissão, no entanto, suas limitações se tornam aparente quando há intenção de monitorar micro perturbações e fator de potência com exatidão. A medição por fasores sincronizados, que fazem uso da PMU, forneceram melhores perspectivas de medição e aquisição de dados importantes para o controle de parâmetros mais sensíveis. Como alternativa mais recente, os sistemas de aquisição POW proporcionam taxas de amostragem vastamente superiores àque-las obtidas mesmo por sincrofasores, garantindo maior refinamento e resolução para análise de perfis anômalos.

Dado este cenário, torna-se evidente a relevância e magnitude do empenho dedi-cado ao projeto de pesquisa e desenvolvimento TECCON II e à Solução TECCON, que atualmente opera em uma linha de transmissão de 230 kV em um município de Santa Catarina. O desenvolvido foi uma solução integrada de monitoramento e aquisição de dados altamente poderosa, resultante de uma prova de conceito bem sucedida. Ao

aliar as tecnologias óticas aos sistemas de monitoramento em tempo real, a ciência brasileira impulsiona o sistema elétrico mundial a explorar as alternativas óticas para aplicação de sensoriamento e comunicação, com a oportunidade de usufruir de todas as vantagens operacionais sem dispensar as técnicas mais avançadas de aquisição de dados.

Com acesso à bancada experimental da Solução TECCON, foi possível validar muitos dos benefícios operacionais, que incluem os aspectos de segurança de manuseio, velocidade de resposta e exatidão das medições. Ao mais, propiciou o conhecimento das limitações da aplicação desenvolvida, como a sensibilidade a atenuação e fratura da fibra ótica, em situações de estresse mecânico. Os ensaios propostos resultaram em um maior entendimento do comportamento do sistema de medição de corrente implementado, revelando as particularidades dos arranjos selecionados para os experimentos.

A partir da análise dos resultados alcançados, torna-se evidente a sensibilidade do sistema de sensoriamento de corrente às variações de potência ótica, cujo perfil de resposta foi identificado. A escolha por valores próximos aos limites inferiores de medição do sensor RIG providenciou um melhor entendimento no efeito da potência fornecida pelas fontes na medição, do qual se identificou a faixa ótima de operação, entre -29 e -27 dBm, para que se atinja leituras com maior confiabilidade. Operando neste intervalo sensível, até mesmo a medição da corrente de 10 A no condutor foi realizada.

Alterando a fonte ótica implementada, foram notáveis os efeitos na resposta de conversão ótico-elétrica do sensoriamento. A densidade de tensão mais elevada no comprimento de onda utilizado proporcionada pela fonte laser DFB, em decorrência de seu espectro de banda estreita centrada em 1550 nm, confere ganho do nível de tensão convertida nas placas eletrônicas, se comparada à densidade de potência fornecida pela fonte ASE que, mesmo com seletividade do canal útil, emite luz a comprimentos de onda na vizinhança de 1550 nm a maiores potência que o emitido pela alternativa laser de retroação distribuída. O nível de tensão ampliado confere ao sistema menor sensibilidade a variações de potência ótica que atinge os fotodetectores e maior resolução das medidas feitas.

As vantagens operacionais observadas na substituição da fonte ASE pelo laser DFB são potencializadas pelos benefícios econômicos. O valor de mercado para aquisição do modelo de laser DFB utilizado, da fabricante **oeMarket**, é cerca de dez vezes menor que aquele da fonte ASE, da fabricante **MWTechnologies**. Vale salientar que o *driver* utilizado para controle do laser DFB aumenta o valor financeiro do conjunto, porém não há necessidade de aquisição de um controlador de laser com interface ao usuário, já que, para implementação na solução em campo, a fonte ótica faz parte do interrogador e não tem acesso direto dos operadores.

No entanto, a implementação da fonte de espectro de banda larga traz o benefício de prover diversos canais para as diferentes aplicações do projeto onde, caso se deseje utilizar as fontes laser DFB de feixe estreito, devem ser adotadas fontes dedicadas para cada funcionalidade da Solução e não haja sobreposição de canais. Isso eliminaria a qualidade de integrabilidade entre as funções da Solução, todavia o benefício econômico prevalece, visto que a aquisição de uma fonte para cada um dos quatro sensores (corrente, temperatura, tração, EM) ainda representa economia financeira em relação à aquisição de uma fonte ASE de banda larga.

Embora os experimentos conduzidos trouxeram consigo múltiplos insumos para análise e otimização da Solução TECCON, existem ainda tópicos para estudo e avaliação que restam ser explorados para refinamento das conclusões a respeito do sistema desenvolvido. Para trabalhos futuros, sugere-se:

- Ensaios utilizando o *setup* estabelecido no presente trabalho para valores superiores de corrente no condutor: a continuidade dos experimentos para demais magnitudes dentro da escala do sensor RIG possibilitará maior confiabilidade da regressão linear para obtenção da curva de calibração, resultando em ganho de exatidão no ajuste dos parâmetros de medição. Os resultados colhidos para diferentes valores de potência ótica poderão corroborar a hipótese de faixa sensível definida para o sistema.
- Aplicação de diferentes modelos de fotodetectores nas entradas elétricas das placas eletrônicas: a transdução ótica-elétrica é uma etapa essencial do funcionamento da Solução e que pode ser explorada de forma mais analítica ou empírica, como se fez com os estudos comparativos das fontes óticas. As diferenças nos perfis de ganho de tensão e sensibilidade às variações de potência ótica entre múltiplos modelos comerciais de fotodetectores podem ser sutis, contudo, o impacto na otimização dos sistemas de sensoriamento é possivelmente relevante.
- Estudo e desenvolvimento de controle em malha fechada da potência ótica: um dos maiores desafios dos sistemas de comunicação e sensoriamento óticos é a estabilidade do nível de potência luminosa, devido às atenuações decorridas de deformações da fibra, comportamento instável de elementos passivos e conexões mal encaixadas nos circuitos óticos. Em particular, a Solução TECCON, em sua funcionalidade de medição de corrente, demonstrou alta sensibilidade a estas variações. Para os ensaios realizados no presente trabalho, o controle da estabilidade foi realizado através da variação da alimentação da fonte laser DFB a partir da IHM de seu *driver*, monitorando as leituras colhidas pelo medidor de potência ótica. Para a implementação em campo, onde o conjunto interrogador

deve se autorregular, faz-se necessário o desenvolvimento de um sistema de controle que mantenha o nível de potência nos fotodetectores dentro da faixa ótima de operação.

# REFERÊNCIAS

- ANEEL - AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **TECCON II - Tecnologia de Sensores em Fibras Ópticas para Supervisão, Controle e Proteção de Sistemas de Energia Elétrica**: Relatório Final do Projeto de Pesquisa e Desenvolvimento ANEEL PD-2651-0011/2015. Brasil, dez. 2020. P. 107.
- ARRUDA, Eduardo H. Z. **Análise de Eventos em Sistemas Elétricos de Potência em Tempo Real Utilizando Sincrofasores e a Transformada Wavelet Discreta**. Dissertação – Universidade Federal de Santa Catarina, 2017.
- BASTOS, Talita P. **Redes de Bragg em Fibra Óptica: Análise de Encapsulamentos em Resposta à Vibração e Temperatura**. Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Ponta Grossa, 2016.
- BLAKE, J. *et al.* **Optical Current Transducers for High Voltage Applications**. Phoenix, AZ, EUA: NxtPhase Corporation, 2016. Disponível em: <https://www.poweronline.com/doc/be-our-guest-optical-current-transducers-for-0001>.
- BOAVIDA, José Maria B. M. **Modelação e Caracterização de um Díodo Laser de Retroacção Distribuída (DFB)**. Dissertação – Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, Portugal, 2009.
- BOHNERT, K. E.; GABUS, P.; BRÄNDLE, H. **Fiber-optic current and voltage sensors for high-voltage substations**. Nara, Japan: Proceedings of the 16th International Conference on Optical Fiber Sensors, 2003.
- BRÍGIDA, Angela C. S. **Caracterização e desenvolvimento de sensores ópticos de corrente elétrica para aplicações em linhas de alta tensão**. Tese de Doutorado – Universidade Federal do Pará, 2017.
- CHAVES, C. F. **Transformador de corrente eletrônico utilizando Bobina de Rogowski e interface óptica com POF para aplicação em sistemas de potência**. Dissertação – 110. Rio de Janeiro, RJ, Brasil: COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2008.
- CHROMIK, J.; REMKE, A.; HAVERKORT, B. An integrated testbed for locally monitoring SCADA systems in smart grids. **Energy Inform**, v. 1, n. 56, 2018.
- CONSTAIN, Nicole B. P. **Integração de Sistemas SCADA com a Implementação de Controle Supervisório em CLP para Sistemas de Manufatura**. Dissertação – Universidade Federal de Santa Catarina, 2011.

DAVIDOVICH, Liema. Os quanta de luz e a ótica quântica. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 37, p. 4205–1, 2015. DOI: [10.1590/S1806-11173732073](https://doi.org/10.1590/S1806-11173732073).

DIAS, P. M. **Desenvolvimento de sensor óptico para a medição de corrente eléctrica em sistema de alta tensão**. Dissertação – Porto, Portugal: Departamento de engenharia Electrotécnica e de Computadores, Faculdade de Ciências da Universidade do Porto, 1998.

DUTTON, Harry J. R. **Understanding Optical Communications**. IBM. International Technical Support Organization, 1998.

EHRENSPERGER, Juliana G. **Sistemas de Medição Fasorial Sincronizada: Análise do Estado da Arte e Aplicações no Monitoramento de Sistemas de Energia Elétrica**. Dissertação – Universidade Federal de Santa Catarina, 2004.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **ANUÁRIO ESTATÍSTICO DE ENERGIA ELÉTRICA 2022**: Ano Base 2021. Brasil, 2022. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/anuario-estatistico-de-energia-eletrica>.

AMPLIFIED Spontaneous Emission (ASE). Acessado em 03/08/2022. FiberLabs Inc. 2021. Disponível em: <https://www.fiberlabs.com/glossary/amplified-spontaneous-emission/>.

HAYES, Jim. **Guia de Referência sobre Fibra Óptica da FOA: Guia de Estudo para a Certificação da FOA**. 1. ed. Edinburgh Gate, Harlow, Essex, CM20 2JE, England: The Fiber Optic Association Inc, 2022.

HENRIQUE, Clayrton Monteiro. **Monitoramento e Análise Multivariada de Perturbações em Sistemas de Transmissão de Energia Elétrica**. Qualificação de Mestrado – Universidade Federal de Santa Catarina, 2021.

JORGE, P. A. **Sensores Ópticos para Medição de Corrente Elétrica em Alta-tensão**. Dissertação – 166f. Porto, Portugal: Departamento de Física, Faculdade de Ciências da Universidade do Porto, 2001.

KOPKO, Kaio. **Análise dos Impactos da Medição Fasorial Sincronizada na Estimção de Estados Face à Implementação em Curso de Sincrofasores no Sistema Elétrico Brasileiro**. Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Federal de Santa Catarina, 2018.

KOVALENKO, Panel Y. *et al.* **Synchrophasor Evaluation Based on Point-on-Wave Measurements**. In: URAL SMART ENERGY CONFERENCE (USEC), 2020.

LEANDRO, Rodolfo B. **Identificação em Tempo Real de Oscilações Eletromecânicas Utilizando Sincrofasores**. Dissertação – Universidade Federal de Santa Catarina, 2014.

LIMA, D. K. **Transformadores para instrumentos ópticos: aspecto da viabilidade do seu uso pelas empresas do setor elétrico brasileiro**. Dissertação – 123f. São Paulo, Brasil: Departamento de Engenharia de Energias e Automação Elétrica, Escola Politécnica de São Paulo, 2009.

MARTINS, Daniel A. **Centros de Controle de Sistemas Elétricos de Potência: Uma descrição funcional de sistemas de supervisão e controle**. [S./], 2018.

MEDEIROS, Sara. **Transformadores de Corrente Óticos: Análise Técnica e de Viabilidade Tecnológica**. Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Federal de Santa Catarina, 2016.

MÜLLER, Max L. **Sistema Supervisório e Aquisição de Dados de uma Usina de Geração Fotovoltaica**. Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Federal de Santa Catarina, 2017.

MW TECHNOLOGIES. **cLDD**. [S./]. Acessado em 12/10/2022. Disponível em: <https://mw-technologies.com/product/cldd/>.

NASCIMENTO, I. M. **Optical fiber sensors technology for supervision, control and protection of high power systems**. Dissertação – Porto, Portugal: Faculdade de Ciências, Universidade do Porto, 2016.

NAZARÉ, F. V. **Sensor Opto-magnético de corrente elétrica para linhas de transmissão**. Tese – Rio de Janeiro, RJ, Brasil: COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2014.

NORTH AMERICAN SYNCHROPHASOR INITIATIVE. **High-resolution Time-synchronized Grid Monitoring Devices**: Technical Report. EUA, 2020.

1550NM DFB Laser Diode - High Power Butterfly Package. Acessado em 09/10/2022. oeMarket.com. 2022. Disponível em: [http://www.oemarket.com/catalog/product\\_info.php/1550nm-dfb-laser-diode-high-power-butterfly-package-p-192?osCsid=aefa8bbbc1177ce50ceb0b7f3eff899a](http://www.oemarket.com/catalog/product_info.php/1550nm-dfb-laser-diode-high-power-butterfly-package-p-192?osCsid=aefa8bbbc1177ce50ceb0b7f3eff899a).

RIBEIRO, A. B. Lobo *et al.* **Optical Fiber Sensor Technology in Portugal**. [S./], 2005. P. 171–199. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/01468030590922722>.

ROBL, Bernardo B. **Sensoriamento Óptico da Tração Mecânica em Linhas de Transmissão**. Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Federal de Santa Catarina, 2020.

SCHOLL, Marcos V. **Sistema SCADA Open Source**. Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Federal do Rio Grande, 2015.

SENIOR, John M. **Optical Fiber Communications: Principles and Practice**. 3. ed. Edinburgh Gate, Harlow, Essex, CM20 2JE, England: Pearson Education Limited, 2009.

SHIMODA, Koichi; TAKAHASI, Hidetosi; H. TOWNES, Charles. Fluctuations in Amplification of Quanta with Application to Maser Amplifiers. **Journal of the Physical Society of Japan**, v. 12, n. 6, 1957. Disponível em:

<https://doi.org/10.1143/JPSJ.12.686>.

SILVA, Ricardo M. *et al.* **Optical Current Sensors for High Power Systems: A Review**. [S.l.], 2012.

SILVA DE SOUSA, João Manuel da. **Fontes de Alta Potência em Fibra Óptica**. College of Advanced Interdisciplinary Studies, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China, 1999.

VIEIRA, Pedro C. C. **Estudo de Desempenho de Canais de Instrumentação para a Medição Sincronizada de Fasores**. Dissertação – Universidade Federal de Santa Catarina, 2014.

WANG, Kaifeng *et al.* **Broadband, Continuous-Wave, Mid-Infrared Generation Based on ASE Fiber Source**. College of Advanced Interdisciplinary Studies, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China, 2022.

WANG, Wei-Chih. **Optical Sources**. Department of Mechanical Engineering, University of Washington. ME557, 2012.

ZARZOSA, Marcos A. D. **Análise de Eventos em Sistemas de Energia Elétrica Usando Sincrofasores**. Dissertação – Universidade Federal de Santa Catarina, 2016.