



**UNIVERSIDADE
FEDERAL
DE PERNAMBUCO**



Universidade Federal de Pernambuco
Centro de Tecnologia e Geociências
Departamento de Eletrônica e Sistemas



Graduação em Engenharia Eletrônica

Heitor Vinicius Vieira do Nascimento

**Sistema de alimentação elétrica por fibra óptica para
Internet das Coisas**

Recife

2023

Heitor Vinicius Vieira do Nascimento

Sistema de alimentação elétrica por fibra óptica para Internet das Coisas

Trabalho de Conclusão apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Eletrônica, do Departamento de Eletrônica e Sistemas, da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Eletrônica.

Orientador(a): Prof. Leonardo Didier Coelho, Dr.

Recife
2023

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do programa de geração automática do SIB/UFPE

Nascimento, Heitor Vinicius Vieira do.

Sistema de alimentação elétrica por fibra óptica para Internet das Coisas /
Heitor Vinicius Vieira do Nascimento. - Recife, 2023.

90 p : il., tab.

Orientador(a): Leonardo Didier Coelho

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal de
Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Engenharia Eletrônica -
Bacharelado, 2023.

1. Alimentação elétrica por fibra óptica. 2. Power-over-Fiber. 3. Fibra óptica.
4. Telecomunicações. 5. IoT. I. Coelho, Leonardo Didier. (Orientação). II. Título.

620 CDD (22.ed.)

Heitor Vinicius Vieira do Nascimento

Sistema de alimentação elétrica por fibra óptica para Internet das Coisas

Trabalho de Conclusão apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Eletrônica, do Departamento de Eletrônica e Sistemas, da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Eletrônica.

Aprovado em: 25/09/2023

Banca Examinadora

Prof. Leonardo Didier Coelho, Dr.
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Joaquim Ferreira Martins Filho, Ph.D.
Universidade Federal de Pernambuco

*À eterna memória de meu avô e
de minha mãe.*

Agradecimentos

Primeiramente, agradeço ao meu avô, Arlindo, e à minha avó, Ivonete, por tudo o que fizeram por mim, pelo amor incondicional e por toda a sabedoria compartilhada comigo; sem vocês, nada disso seria realizável.

Agradeço aos membros mais próximos da minha família, em especial minhas irmãs, Layssa e Lylian, meu padrasto, Marcone e todos os outros que têm ciência de que fizeram parte de minha jornada e me apoiaram desde o início.

Agradeço aos meus amigos por todos os momentos de estudo, apoio, diversão e aprendizado que compartilhamos ao longo desses anos. A jornada foi difícil, mas ter vocês ao lado tornou o caminho mais leve, interessante, suportável e feliz; sempre vou olhar para esses momentos com carinho e com boas lembranças de um tempo em que aprendi lições para a vida.

Agradeço ao meu orientador e mentor, professor Leonardo Didier, por toda a paciência, apoio, pela ajuda fundamental nas disciplinas, projetos (e neste trabalho, em específico), e por todo conhecimento transmitido com maestria durante esses anos de curso. Seus ensinamentos foram fundamentais para esta conquista.

Agradeço também a todos os professores e mestres dos quais fui aluno, pois tiveram uma contribuição relevante e ímpar nesta jornada. Em especial, gostaria de agradecer aos professores Luiz Gonzaga, Ricardo Bortolotti, Hermano Cabral, Daniel de Filgueiras, João Marcelo e Guilherme Melo.

*"What we observe is not nature in
itself but nature exposed to our
method of questioning."*

Werner Heisenberg

Resumo do Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Departamento de Eletrônica e Sistemas, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Eletrônica(Eng.)

Sistema de alimentação elétrica por fibra óptica para Internet das Coisas

Heitor Vinicius Vieira do Nascimento

O presente trabalho é um registro da implementação em laboratório de um sistema de alimentação elétrica por fibra óptica, ou *Power-over-Fiber* (PoF). Este estudo procura definir as características do sistema proposto, seu potencial de utilização, seus principais componentes, suas limitações e alguns contextos de aplicação. A configuração do sistema que foi adotada para montagem experimental é um cenário compartilhado no qual a transmissão simultânea de dados e potência entre uma unidade de origem (Unidade de Controle) e uma unidade de sensoriamento, geralmente remota (Unidade Remota) é feita através do uso de dois lasers com diferentes comprimentos de onda: um laser de bombeio (ou laser Raman) comercial de alta potência para lançamento de potência óptica a aproximadamente 1435 nm e um laser de dados a aproximadamente 1541 nm, ambos injetando luz em uma mesma fibra óptica monomodo (SMF). A potência de ambos os comprimentos de onda é inserida na mesma fibra através de um multiplexador óptico WDM, enquanto que, após percorrer a fibra, um acoplador óptico divide o sinal de luz em dois canais: uma parcela menor da potência é usada para a comunicação de dados entre a unidade de controle e a Unidade Remota, enquanto o restante - que é a maior parte da energia do enlace - é utilizado para o fornecimento de potência para a Unidade Remota. Idealmente, a potência óptica de saída é introduzida em conversores - ou células - fotovoltaicos (PVCs), que transformam a potência óptica em potência elétrica, que pode ser utilizada para alimentar dispositivos de baixa alimentação de potência, a princípio. Com o auxílio de um analisador de espectro óptico (OSA) e um medidor de potência óptica, buscou-se avaliar a capacidade de fornecimento de potência elétrica na saída do sistema, considerando a eficiência de um conversor fotovoltaico comercial. Além disso, o sistema

foi projetado e implementado de forma a simular um ambiente real de uso da tecnologia PoF, incluindo possíveis perdas ópticas; assim, buscou-se também fazer um balanço de potência do sistema para identificar pontos de atenuação, nos quais a potência óptica poderia ser melhorada. A transmissão e recepção de dados foram realizadas através de um sistema de Rádio sobre Fibra (RsF) Óptica, ou *Radio-over-Fiber* (RoF), utilizando-se um Rádio Definido por Software (SDR) na frequência de 3,5 GHz. A transmissão de dados foi realizada a uma taxa de 50 Mbits/s com modulação QPSK no ambiente *GNU Radio* para estabelecer a comunicação entre a Unidade Remota e a Unidade de Controle. O trabalho possui caráter de continuidade, já que o experimento montado em laboratório servirá como protótipo para o desenvolvimento, aprimoramento e obtenção de novos resultados envolvendo o sistema de transmissão de energia elétrica por fibra óptica utilizado.

Palavras-chave: alimentação elétrica por fibra óptica; *Power-over-Fiber*; fibra óptica; telecomunicações; IoT.

Abstract of Course Conclusion Work, presented to the Department of Electronic and Systems, as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Bachelor of Electronic Engineering(Eng.)

Power-over-Fiber System for Internet of Things

Heitor Vinicius Vieira do Nascimento

The present study records the laboratory implementation of a system electrically supplied by optical fiber, or simply Power-over-Fiber (PoF) system. The aim of this work is to define the system characteristics, its potential serviceability, its main components, limitations and some applications. The adopted system configuration for the experimental realization is a shared-scenario in which two lasers with different wavelengths perform a simultaneous transmission of both data and power from a source station (Control Unit) to a distant, usually remote location (Remote Unit or Sensor Node): a commercially-available, high-power pump laser (or Raman laser) for optical power launching at near 1435 nm and a DFB data laser at approximately 1541 nm, both propagating in a single mode fiber (SMF). Power from both wavelengths is launched into the same fiber through an optical WDM multiplexer and after propagating in the fiber, an optical coupler divides the signal in two channels: a smaller fraction of the transmitted power is used to perform the communication between the Control Unit and the Remote Unit while the remaining most part of the power serves as a power supply to the Remote Unit. Ideally, the system output power is sent to photovoltaic power converters (PPCs) that transform the optical power into electrical power that can be used to primarily supply low-powered devices. Using an Optical Spectrum Analyzer (OSA) and an optical power meter, the potential system electrical power output capacity was estimated by considering the typical efficiency of a commercially-available photovoltaic power converter. Moreover, the system was designed and implemented in order to simulate a Power-over-Fiber real scenario, including its possible optical attenuation. A optical power budget analysis was also performed in order to detect possible optical loss points in which optical power could be enhanced. The data

transmission and reception was performed through a Radio-over-Fiber system, using a Software-Defined Radio operating at 3.5 GHz. Data was transmitted via a QPSK signal at 50 Mbits/s in the GNU Radio environment in order to establish a communication between the control unit and the remote unit. This work was set to have a follow-up as the laboratory set up experiment will serve as a prototype system for future development, improvement and gathering of new results regarding the Power-over-Fiber system.

Keywords: *Power-over-Fiber*; fiber optics; power transmission; telecommunications; *IoT*.

Sumário

1	Introdução	22
1.1	Justificativa	25
1.2	Objetivo Geral	26
1.2.1	Objetivos específicos	26
1.3	Organização do TCC	27
2	Fundamentação Teórica	29
2.1	Visão geral do sistema	29
2.2	Fontes ópticas	31
2.3	Fibra óptica	35
2.4	Conversores fotovoltaicos	37
2.5	Arquiteturas de sistemas de alimentação elétrica por fibra óptica	40
2.6	Fenômenos ópticos	42
2.6.1	Atenuação	42
2.6.2	Absorção material	43
2.6.3	Espalhamento Rayleigh	44
2.6.4	Espalhamento Raman Estimulado (SRS) e Espalhamento de Brillouin Estimulado (SBS)	44
2.6.5	<i>Fiber Fuse</i>	45
2.7	Outros componentes e ferramentas	47
2.7.1	Acoplador óptico	47
2.7.2	Modulador <i>Mach-Zehnder</i> (MZM)	48

2.7.3	Rádio Definido por software (SDR)	49
2.7.4	<i>GNU Radio</i>	49
3	Desenvolvimento	51
3.1	Sistema proposto	51
3.2	Componentes e equipamentos utilizados	54
3.2.1	Laser de alta potência (HPLS)	54
3.2.2	Laser DFB	55
3.2.3	SDR USRP X310	57
3.2.4	Modulador óptico <i>Mach-Zehnder</i>	58
3.2.5	Fotodiodo	58
3.2.6	Filtro sintonizável	60
3.2.7	Multiplexador WDM	61
3.2.8	Acoplador óptico	61
3.2.9	Fibra óptica	62
3.2.10	Medidor de potência óptica	62
3.2.11	Cordões de fibra óptica	62
3.3	Metodologia e experimentos	64
3.3.1	Caracterização do sistema	65
3.4	Resultados e análise	68
3.4.1	Caracterização das fontes ópticas	68
3.4.2	Caracterização dos demais pontos	71
3.4.3	Conversão Óptico-Elétrica e Potência Disponível na Unidade Remota	83
4	Considerações Finais	86
4.1	Conclusão	86
4.2	Dificuldades Encontradas	87
4.3	Trabalhos Futuros	87
	Referências	89

Lista de Ilustrações

2.1	Diagrama simplificado de um sistema <i>Power-over-Fiber</i> . (Fonte: o autor.) .	30
2.2	Representação de um laser de junção p-n. Fonte: (REZENDE, 2015). . . .	32
2.3	Representação unidimensional de um laser de heterojunção (superior); diagrama de energia das bandas de valência e de condução na situação de equilíbrio (centro); diagrama de energia para o caso de polarização direta (inferior). Fonte: (REZENDE, 2015).	33
2.4	Diagrama de bandas espectrais de um sistema <i>Power-over-Fiber</i> , que relacionam parâmetros importantes em um projeto desse tipo: as perdas ópticas (em dB/km); a responsividade dos conversores fotovoltaicos (em A/W) de acordo com seu material de fabricação e do comprimento de onda λ ; a região de operação de fontes ópticas em função do comprimento de onda da radiação emitida. A linha tracejada representa a atenuação da fibra em função do comprimento de onda e da região espectral. Fonte: (ROSOLEM, 2017).	34
2.5	Diagrama de um sistema <i>Power-over-Fiber</i> com <i>links</i> ópticos separados para dados e potência. (Fonte: o autor.)	41
2.6	Diagrama de um sistema <i>Power-over-Fiber</i> no qual o sinal óptico de potência e o sinal de dados são trafegados na mesma fibra, através da tecnologia WDM. (Fonte: o autor.)	42
2.7	Danos causados pelo efeito de <i>Fiber Fuse</i> em uma fibra óptica SMF. Fonte: (CARDONA, 2022).	46
2.8	Acoplador óptico com duas entradas e duas saídas. (Fonte: o autor.)	47

2.9	Modulador <i>Mach-Zehnder</i> . Fonte: (COELHO, 2010).	48
3.1	Diagrama representativo do sistema de alimentação elétrica por fibra óptica montado em laboratório. (Fonte: o autor.)	52
3.2	Sistema de alimentação elétrica por fibra óptica montado em laboratório. (Fonte: o autor.)	53
3.3	Laser de alta potência utilizado no trabalho, acomodado numa estrutura <i>butterfly</i> . (Fonte: o autor.)	54
3.4	Controlador de corrente e temperatura utilizado para o ajuste da potência de saída do laser de diodo de bombeio (HPLS). (Fonte: o autor.)	55
3.5	Laser DFB utilizado no trabalho, acomodado numa estrutura de apoio <i>butterfly</i> . (Fonte: o autor.)	56
3.6	Controlador de corrente e temperatura utilizado para o ajuste de potência de saída do laser DFB de dados no sistema. (Fonte: o autor.)	57
3.7	Rádio Definido por software USRP X310 utilizado no trabalho. (Fonte: o autor.)	58
3.8	Modulador externo <i>Mach-Zehnder</i> e fotodetector PIN com amplificador integrado. (Fonte: o autor.)	59
3.9	Imagem frontal do experimento montado em bancada no laboratório de Fotônica, na qual é possível se observar o sistema completo; em especial, destaque para as fontes de tensão e <i>sourcemeter</i> utilizados na polarização do modulador externo. (Fonte: o autor.)	59
3.10	Filtro sintonizável utilizado no trabalho. (Fonte: o autor.)	60
3.11	Multiplexador óptico WDM que recebe os sinais de dados e potência com diferentes comprimentos de onda e realiza a multiplexação na mesma fibra. (Fonte: o autor.)	61
3.12	Acoplador óptico na saída do link de fibra SMF, que separa a luz em dois caminhos ópticos: um para dados e outro para fornecimento de potência. (Fonte: o autor.)	61
3.13	Fibra óptica SMF utilizada no sistema. (Fonte: o autor)	62

3.14	Medidor de potência óptica utilizado no trabalho. (Fonte: o autor.)	63
3.15	Cordões de fibra monomodo (SMF). (Fonte: o autor.)	63
3.16	Refletômetro no domínio do tempo (OTDR) utilizado no trabalho. (Fonte: o autor.)	64
3.17	Pontos de caracterização do sistema num primeiro cenário: o laser de alta potência e seu controlador de temperatura e corrente se encontram ligados, enquanto o laser DFB e o seu respectivo controlador de temperatura e corrente estão desligados do sistema. (Fonte: o autor.)	66
3.18	Pontos de caracterização do sistema num segundo cenário: neste caso, o laser de alta potência e seu controlador de temperatura e corrente se encontram desligados, enquanto o laser DFB e o seu respectivo controlador de temperatura e corrente são ligados. (Fonte: o autor.)	68
3.19	Curva de caracterização do laser de alta potência (azul); em vermelho, tem-se a curva padrão do dispositivo. (Fonte: o autor.)	70
3.20	Curva de caracterização do laser, segundo o fabricante. (Fonte: JDS Uniphase Corporation).	70
3.21	Espectro óptico em torno do ponto A_1 , capturado através do OSA. (Fonte: o autor.)	73
3.22	Espectro óptico em torno do ponto B_1 , capturado através do OSA. (Fonte: o autor.)	74
3.23	Espectro óptico em torno do ponto C_1 , capturado através do OSA. (Fonte: o autor.)	74
3.24	Espectro óptico em torno do ponto D_1 , capturado através do OSA. (Fonte: o autor.)	75
3.25	Espectro óptico em torno do ponto E_1 , capturado através do OSA. (Fonte: o autor.)	75
3.26	Espectro óptico em torno do ponto F_1 , capturado através do OSA. (Fonte: o autor.)	76

3.27	Espectro óptico em torno dos pontos F_1 e F_2 , capturado através do OSA. (Fonte: o autor.)	77
3.28	Espectro óptico em torno dos pontos C_1 e D_2 , capturado através do OSA. (Fonte: o autor.)	77
3.29	Espectro óptico em torno do ponto A_2 , capturado através do OSA. (Fonte: o autor.)	78
3.30	Espectro óptico em torno do ponto B_2 , capturado através do OSA. (Fonte: o autor.)	78
3.31	Espectro óptico em torno do ponto C_2 , capturado através do OSA. (Fonte: o autor.)	79
3.32	Espectro óptico em torno do ponto D_2 , capturado através do OSA. (Fonte: o autor.)	79
3.33	Espectro óptico em torno do ponto E_2 , capturado através do OSA. (Fonte: o autor.)	80
3.34	Espectro óptico em torno do ponto F_2 , capturado através do OSA. (Fonte: o autor.)	80
3.35	Constelação do sinal QPSK recebida no GNU Radio após transmissão do laser DFB, com o laser HPLS desligado. (Fonte: o autor.)	81
3.36	Constelação do sinal QPSK recebida no GNU Radio após transmissão do laser DFB, com o laser HPLS calibrado a 400 mA em seu controlador. (Fonte: o autor.)	81
3.37	Constelação do sinal QPSK recebida no GNU Radio após transmissão do laser DFB, com o laser HPLS calibrado a 700 mA em seu controlador. (Fonte: o autor.)	82
3.38	Conversor fotovoltaico comercial. Fonte: (KYOTO SEMICONDUCTOR Co., Ltd., 2023).	83
3.39	Características físicas e parâmetros de corrente, tensão e potência de saída do conversor fotovoltaico da <i>Kyosemi</i>	84

3.40 Exemplos de associação de conversores fotovoltaicos: (a) Em série; (b) Em paralelo; (c) Combinação série-paralelo. Fonte: (SOUZA, 2023). 85

Lista de Tabelas

3.1	Especificações do acoplador óptico utilizado. (Fonte: Opneti Communications Co Ltd.).	61
3.2	Caracterização do laser de alta potência (HPLS) através da potência de saída, medida em função da corrente de polarização do controlador. (*Somando-se 26,64 dB do atenuador fixo.). (Fonte: o autor.)	69
3.3	Caracterização do laser DFB de dados. (Fonte: o autor.)	71
3.4	Potência óptica medida nos pontos de caracterização da Figura 3.17, com o controlador de corrente do HPLS fixado em 400 mA. (*Somando-se 26,64 dB do atenuador fixo.). (Fonte: o autor.)	71
3.5	Potência óptica medida nos pontos de caracterização da Figura 3.18, com o controlador de corrente do DFB fixado em 100 mA. (*Somando-se 26,64 dB do atenuador fixo.). (Fonte: o autor.)	72

Lista de Símbolos

α	Coeficiente de atenuação
λ	Comprimento de onda
κ_B	Constante de Boltzmann
η	Eficiência quântica de conversão
A	Ampère
AlGaAs	Arseneto de Alumínio e Gálio
c	Velocidade da luz no vácuo
dB	Decibel
dBm	Decibel miliwatt
e	Carga fundamental do elétron
GaAs	Arseneto de Gálio
Gbit	Gigabit
h	Constante de Planck
InGaAs	Arseneto de Índio e Gálio
LiNbO ₃	Niobato de Lítio
Mbit	Megabit
mW	miliwatt
nm	nanômetro
\mathfrak{R}	Responsividade
Si	Silício
Ti	Titânio
V	Volt
W	Watt
Yr	Itérbio

Lista de Abreviações

5G NR	<i>5G New Radio</i>
AI	Artificial Intelligence
AT&T	American Telephone and Telegraph Company
BER	Bit-Error Rate
CW	Continuous Wave
DFB	Distributed-Feedback
EDFA	Erbium-Doped Fiber Amplifiers
EMI	Electromagnetic Interference
FC	Ferrule Connector
HPLS	High Power Laser Source
IoT	Internet of Things
MCF	Multi-Core Fiber
MDF	Mode Field Diameter
MMF	Multi-Mode Fiber
MUX	Multiplexador
MZM	Mach-Zehnder Modulator
OSA	Optical Spectrum Analyzer
OTDR	Optical Time-Domain Reflectometer
PC	Physical Connector
PMF	Polarization-Maintaining Fiber
PoF	Power-over-Fiber
PPC	Photovoltaic Power Converter
PVC	Photovoltaic Converter
QPSK	Quadrature Phase-Shift Keying
RAU	Remote Antenna Unit
RF	Rádiofrequência

RsF	Rádio sobre Fibra
RoF	Radio-over-Fiber
SDR	Software-Defined Radio
SMF	Single-Mode Fiber
USRP	Universal Software Radio Peripheral
WDM	Wavelength-Division Multiplexing

Capítulo 1

Introdução

O desenvolvimento de tecnologias, materiais e dispositivos relacionados à fibra óptica e à Fotônica em geral vem em uma crescente há algumas décadas, especialmente a partir dos anos 1990. Desde então, a quantidade de aplicações envolvendo a transmissão - de dados ou potência - por fibras é cada vez mais presente, seja na indústria, academia ou em aplicações cotidianas.

Ao longo desse desenvolvimento, a maioria das aplicações envolvendo fibras ópticas se concentrou na transmissão de dados e nos aspectos técnicos de como melhorar a qualidade desta transmissão, sendo abordados alguns aspectos principais, como a taxa de erro de *bit* (BER), aumento da taxa de transmissão de bits, gerenciamento de perdas ópticas e a influência de efeitos ópticos lineares ou não-lineares. Porém, aplicações envolvendo o transporte de potência óptica através da fibra possuíram um progresso discreto, pouco visível em aplicações mais palpáveis.

Apesar disso, a chamada técnica de alimentação elétrica por fibra óptica, ou *Power-over-Fiber*, se mostrou cada vez mais viável, fato evidenciado pelas descobertas e estudos mais sólidos que surgiram nas últimas décadas.

Historicamente, tomando-se o contexto de transmissão de energia elétrica, o cobre é utilizado para a confecção de cabos elétricos desde o século XIX - usado em inicialmente em telégrafos - e, com o passar das décadas, deu origem a uma extensa rede mundial de distribuição de energia, especialmente para longas distâncias. Até hoje, se configura massivamente como a principal forma de distribuição de energia elétrica, por sua tradição,

confiabilidade e custo benefício quando comparada com outras formas alternativas. Além disso, modalidades alternativas de transmissão de energia elétrica não são viáveis até o momento pois não conseguem entregar o que os fios de cobre fazem de melhor: transmitir altas potências por longas distâncias. Porém, como será mostrado neste trabalho, algumas aplicações são viáveis, ainda que timidamente, utilizando sistemas alternativos, como o PoF.

Partindo de uma ideia desenvolvida inicialmente nos laboratórios da multinacional estadunidense do ramo de telecomunicações AT&T (*American Telephone and Telegraph Company*) na década de 1970, para fornecer energia parcialmente a um telefone (RO-SOLEM, 2017), o método de se fornecer potência elétrica a um determinado ponto usando-se a fibra óptica como meio de propagação de potência óptica para, após uma conversão óptico-elétrica, alimentar um dispositivo de interesse se mostrou completamente possível. Considerado por muitos autores como o primeiro trabalho envolvendo a alimentação elétrica por fibra óptica, o experimento citado consistia na transmissão unidirecional de luz com comprimento de onda 801 nm, a uma distância de alguns metros, para alimentar um gerador de tom sonoro. A transmissão teve êxito, mostrando a viabilidade de se converter cerca de 5,95 mW de potência óptica em 3,1 mW de potência elétrica, ou seja, com cerca de 52% de eficiência de conversão da célula fotovoltaica de GaAlAs utilizada. Pouco tempo depois, o experimento foi aperfeiçoado para se estabelecer uma comunicação bidirecional entre uma unidade central e uma unidade remota alimentada através de um link de fibra de de 1,1 km de extensão.

Apesar de as ideias e experimentos iniciais por trás do PoF remontarem a algumas décadas atrás, apenas neste milênio houve um maior interesse no desenvolvimento desta tecnologia graças à crescente capacidade de se entregar altas potências provenientes de fontes ópticas, ao passo que as dimensões do sistema se mantiveram compactas (SOUZA, 2023). As aplicações do PoF variam entre o fornecimento apenas de potência elétrica através de fibra óptica para aplicações específicas, ou, que é o caso mais comum, até a transmissão tanto de dados quanto de potência pelo link, para se alimentar dispositivos que precisam, de alguma forma, se comunicar com uma unidade de controle.

Em linhas gerais, um sistema de alimentação elétrica por fibra óptica é formado por três elementos principais: uma fonte óptica - em geral, um laser de alta potência (HPLS) - um link de fibra óptica e uma ou mais células ou conversores fotovoltaicos (PVCs). Somado a essa configuração, há a presença de um ou mais dispositivos de interesse que recebem a energia elétrica dos PVCs e que são conectados no final do sistema.

Os estudos envolvendo fibras ópticas, em sua maior parte, concentravam-se na área de Telecomunicações e sensores. Após décadas de pesquisa e desenvolvimento, foram-se concretizando aplicações de PoF em cenários onde a transmissão de energia por cabos elétricos de cobre torna-se inviável devido a fatores diversos, sendo a interferência eletromagnética (EMI) em estações de distribuição de energia e o peso considerável do volume de cabos dependendo da aplicação (*e.g.*, monitoramento submarino) (DIOUF; QUIN-TARD; GHISA, 2020) alguns destes cenários. Assim, algumas características físicas das fibras ópticas as tornam substitutas adequadas nessas configurações.

Por outro lado, apesar de suas consideráveis vantagens, a técnica de *Power-over-Fiber* possui aplicabilidade limitada devido a algumas características próprias de implementação, limitações físicas do sistema e viabilidade financeira. Como exemplo, a tentativa de se obter potências maiores que algumas dezenas de *watts* de potência na transmissão por um sistema de alimentação por fibra óptica é um fator limitante do potencial energético dessa técnica, em que efeitos ópticos indesejáveis podem surgir durante a propagação da luz - como o efeito de *fiber fuse* - devido a características intrínsecas à própria fibra (CARDONA, 2022). Outra limitação resultante da transmissão de altas potências na fibra é o superaquecimento do revestimento da fibra, que leva a um estado de degradação e conseqüente redução de sua vida útil. Pode-se citar como outra limitação prática a atenuação do sinal óptico ao se curvar ou dobrar a fibra além de um limite crítico, resultando em fuga de potência do núcleo da fibra para o seu revestimento; transmitir altas potências nessas condições pode culminar num aquecimento localizado neste ponto de dobra, levando à degradação do sinal. Por fim, mas não menos importante, a capacidade de conversão óptica-elétrica dos conversores fotovoltaicos usualmente utilizados pode se apresentar como um gargalo para a empregabilidade do PoF em alguns cenários.

Assim, certas propriedades físicas das fibras ópticas agem de forma dual num sistema de alimentação por fibra óptica, seja para viabilizar seu funcionamento quanto para impor suas limitações.

Em síntese, é se de esperar que a alimentação por fibra óptica seja complementar ao fornecimento de energia elétrica tradicional em contextos de baixa potência, para fornecer energia pontualmente a dispositivos remotos, como sensores, câmeras e dispositivos IoT. Esse contexto de aplicações traz flexibilidade de integração de novas tecnologias ao cenário atual de versatilidade, mobilidade e fluidez da comunicação global.

1.1 Justificativa

A motivação do presente trabalho é evidenciada através das crescentes oportunidades de aplicação do sistema *Power-over-Fiber* descobertas ao longo das últimas décadas. Como principais implementações já realizadas ao longo desse tempo, tem-se o uso do PoF em sensoriamento de redes elétricas de alta tensão; e o sensoriamento em ambientes hostis, como o monitoramento de níveis de gases nocivos presentes em minas (ROSOLEM, 2017), o sensoriamento radioativo em plantas geradoras de energia nuclear, o sensoriamento submarino de pontos localizados a quilômetros de distância de um observatório - ou centro de controle (CARDONA, 2022) e alimentação de unidades remotas de antenas (RAU) em sistemas RsF, ao se substituir um cabo óptico-elétrico composto por uma fibra óptica (SOUZA, 2023).

Recentemente, com o advento de tecnologias que requerem estruturas versáteis e dinâmicas, tanto espaciais quanto de conectividade, como o 5G NR, o 6G, o processamento utilizando ferramentas e algoritmos de Inteligência Artificial (AI) e a Internet das Coisas (IoT), novas soluções e materiais são necessários para uma integração robusta e eficiente dessas novas tecnologias; neste cenário ideal, que é a base das chamadas *idades inteligentes*, a fibra óptica desempenha um papel fundamental pois suas vantagens são bastante compatíveis com os contextos e desafios apresentados: a imunidade aos efeitos de EMI, RFI, *crosstalk* e o menor peso do conjunto de cabos, em comparação com os cabos de cobre; o suporte de maior largura de banda - essencial para a consolidação do sistema

5G - e a comunicação entre dois pontos mais segura e confiável, já que não interage com a radiação eletromagnética externa, são algumas das vantagens do uso de fibra óptica para permitir uma integração melhor entre as tecnologias inteligentes mencionadas.

Pode-se apontar também como vantagem do sistema a dispensa do uso de baterias e células solares no fim do link de transmissão, já que modernos conversores fotovoltaicos desempenham o papel de conversão da luz em energia elétrica com uma eficiência considerável. Outros fatores, como o isolamento galvânico, a proteção contra curto-circuitos e faíscas e a menor susceptibilidade a efeitos de corrosão e umidade são vantagens físicas provenientes do uso do PoF; a necessidade de menos espaço físico para a instalação de observatórios, *hubs* e pontos de sensoriamento remoto também constitui uma vantagem espacial e econômica na utilização desse sistema em aplicações atuais.

Assim, é de se esperar que sistemas de alimentação elétrica por fibra óptica venham a contornar dificuldades advindas de limitações do sistema tradicional de transmissão de energia elétrica, além de flexibilizar novas aplicações através de suas versatilidade.

1.2 Objetivo Geral

Este trabalho de graduação busca trazer à tona o sistema de transmissão de energia por fibra óptica através do roteiro apresentado na seção 1.3. Trata-se de uma análise breve e objetiva do tema, apresentada de forma a entender, de forma elementar - mas sólida - o sistema, discutir suas vantagens e desvantagens e verificar sua viabilidade.

Como centro dessa análise, tem-se a montagem experimental, em laboratório, de um sistema de alimentação elétrica por fibra óptica elementar como protótipo inicial de desenvolvimento, servindo de base para aperfeiçoamentos e para a obtenção de resultados mais robustos futuramente.

1.2.1 Objetivos específicos

- Fornecer um embasamento teórico introdutório para melhor compreensão do sistema *Power-over-Fiber*;

- Apresentar sua estrutura básica de funcionamento e principais características;
- Apresentar algumas aplicações e evidenciar problemas de implementação, operação e expansão;
- Fornecer uma breve validação experimental do tema, através da montagem em laboratório de um sistema PoF elementar para a transmissão de potência e dados numa mesma fibra;
- Realizar a caracterização dos componentes do sistema e o balanço de potência em alguns pontos para avaliar a qualidade do link;
- Estimar a potência elétrica que pode ser fornecida pelo sistema, considerando um conversor fotovoltaico comercial;
- Discutir os resultados obtidos do sistema desenvolvido, comparar com possíveis resultados esperados, citar dificuldades encontradas e sugerir modificações, propostas de continuidade e aperfeiçoamentos futuros.

1.3 Organização do TCC

O conteúdo deste TCC está dividido em 4 capítulos. As referências encontram-se nas páginas finais do estudo. É apresentado, a seguir, um resumo da estrutura sob a qual este Trabalho de Conclusão de Curso foi organizado.

Capítulo 2. Fundamentação Teórica. Tem como objetivo mostrar os princípios físicos de funcionamento por trás do sistema como um todo, procurando também descrever individualmente cada um dos elementos que compõem um sistema de alimentação elétrica por fibra óptica. São descritos as fontes ópticas, fibras ópticas e tipos de fibra, conversores fotovoltaicos e fenômenos ópticos pertinentes ao estudo. Além disso, a transmissão de dados e potência numa mesma fibra óptica é um dos objetivos do trabalho e, por isso, também são abordados aspectos e componentes que tratam da comunicação dentro deste contexto, como o rádio definido por software, moduladores, acopladores ópticos e softwares utilizados.

Capítulo 3. Desenvolvimento do estudo. Após o embasamento teórico, buscou-se aplicar os conceitos na confecção prática de um sistema PoF simples, porém suficiente para os propósitos do trabalho. São mostradas as etapas de desenvolvimento, como o ambiente de trabalho, equipamentos utilizados, a escolha e caracterização dos componentes, montagem do aparato, metodologia de trabalho e resultados.

Capítulo 4. Considerações finais. Neste capítulo, busca-se chegar a uma conclusão do estudo, mostrando uma síntese dos objetivos do trabalho, a comparação com os resultados obtidos e dificuldades encontradas na sua realização, além da possível continuação do desenvolvimento do sistema experimental proposto.

Capítulo 2

Fundamentação Teórica

ESTE capítulo tem como objetivo apresentar os conceitos teóricos que dão base ao estudo de sistemas de alimentação elétrica por fibra óptica; a estrutura do sistema, principais componentes, características da transmissão e detalhes de implementação são discutidos neste capítulo. Essa etapa do estudo constitui um importante passo preliminar pois auxilia na compreensão do que será desenvolvido no capítulo seguinte, que trata da elaboração experimental do sistema PoF.

2.1 Visão geral do sistema

A estrutura básica de um sistema de alimentação por fibra óptica é mostrada na Figura 2.1. Uma fonte óptica de alta potência - um laser de semicondutor, por exemplo - e um laser de dados constituem a unidade de controle (ou unidade central), a partir da qual a luz é injetada num link de fibra óptica de, em geral, alguns quilômetros de extensão, conectando a unidade de controle a uma unidade remota de interesse. Nesta unidade, está alocado um conversor fotovoltaico ou célula fotovoltaica (PVC), que detecta a potência lançada pelo laser na fibra em um determinado comprimento de onda e realiza a conversão óptica-elétrica; após esta etapa, a energia da saída do PVC é utilizada para alimentar dispositivos eletrônicos, como circuitos, sensores, câmeras ou outros dispositivos IoT. Os dados são recebidos na unidade remota por um fotodiodo ou por um dispositivo conversor óptico-elétrico e, assim, a comunicação com os sensores é estabelecida.

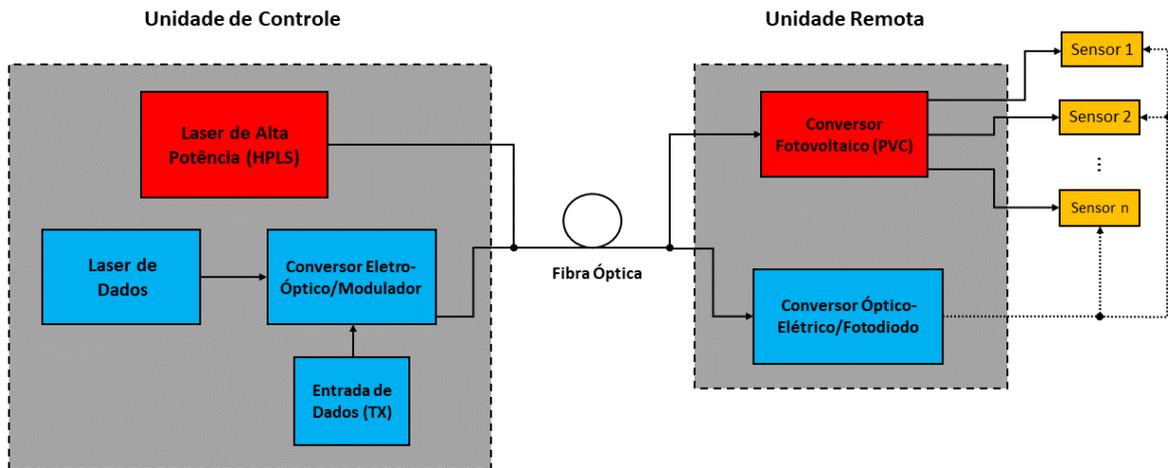


Figura 2.1: Diagrama simplificado de um sistema *Power-over-Fiber*. (Fonte: o autor.)

A unidade remota - e, em consequência, os dispositivos de monitoramento - está localizada, geralmente, em áreas de acesso difícil ou limitado, ou áreas que oferecem algum tipo de risco físico, químico, eletromagnético ou ambiental (LÓPEZ-CARDONA et al., 2018). Alguns exemplos comuns de aplicação são: fundo do mar, subestações de alta tensão elétrica e áreas contendo níveis prejudiciais de gases tóxicos ou outras substâncias nocivas ao ser humano.

Em geral, a unidade de controle não apenas fornece potência à unidade remota, mas também pode estabelecer uma comunicação com ela; os sensores podem, então, enviar atualizações sobre os parâmetros a serem monitorados ou medidos, como: o sinal de vídeo de uma câmera, dados sobre a concentração de determinada substância no ar ou na água, valores de tensão ou corrente em dado ponto de uma rede de distribuição de energia, níveis de determinado tipo de radiação próximos a uma planta de energia nuclear, entre outras diversas variáveis. A interface de comunicação pode ser configurada num link de fibra separado da interface do PoF (ver Figura 2.5); porém, por questões de otimização, custo-benefício e critérios espaciais, é mais vantajoso o envio tanto de dados quanto potência na mesma fibra óptica (Figura 2.6). Assim, reduz-se a quantidade e peso dos cabos ópticos

necessários para se estabelecer a comunicação e alimentação elétrica (CARDONA, 2022).

O principal objetivo da tecnologia *Power-over-Fiber* é a alimentação de dispositivos que não têm grande demanda energética; porém, com o surgimento de novas demandas e da evolução da pesquisa na área, tem-se como objetivo transmitir cada vez mais potência na fibra; atualmente, alguns sistemas implementados chegam a transmitir algumas dezenas de *watts*, o que já é mais que suficiente para alimentar uma unidade remota de antena (RAU) (MATSUURA, 2022). A depender de quantos dispositivos se deseja alimentar e de quais são suas demandas de alimentação de entrada, a capacidade de se entregar mais potência ao final do link com uma eficiência de conversão eletro-óptica atraente torna-se um fator chave para mais aplicações se tornarem viáveis.

Além disso, como muitas aplicações PoF são implementadas em ambientes inóspitos ou sujeitos a intempéries e condições ambientais adversas, fibras com revestimento e estrutura reforçados são apropriadas para estes cenários. Outra tentativa de se facilitar a propagação de altas potências na fibra é a transmissão pela casca de fibras SMF (ROSOLEM, 2017).

2.2 Fontes ópticas

Tipicamente, as fontes ópticas utilizadas para fornecer energia para um sistema de alimentação elétrica por fibra óptica são os lasers de alta potência (HPLS); em especial, o laser de semicondutor é o tipo mais adequado e usado nessa aplicação, apresentando vantagens como suas dimensões relativamente pequenas em comparação com outros tipos de lasers (REZENDE, 2015), baixo custo relativo, baixa potência de alimentação, boa eficiência e a alta potência óptica de emissão (CARDONA, 2022). Como exemplos, têm-se os lasers de AlGaAs - que operam na faixa de 630-900 nm - e os lasers de InGaAs, que operam na faixa de $\lambda \approx 1100-2000$ nm (CARDONA, 2022). Para o primeiro, a potência óptica de emissão pode variar de 10 μW até 10 W, enquanto o laser de InGaAs consegue entregar potências desde alguns mW até algumas dezenas de watts (CARDONA, 2022). Outra opção de fonte óptica são os lasers de fibra, como o de Yr (Itérbio), que opera numa faixa central de $\lambda \approx 1040$ nm (Coherent Corp., 2023).

Os lasers de semicondutor mais comuns são os de diodo, como o *laser de junção p-n*

(Ver Figura 2.2 abaixo).

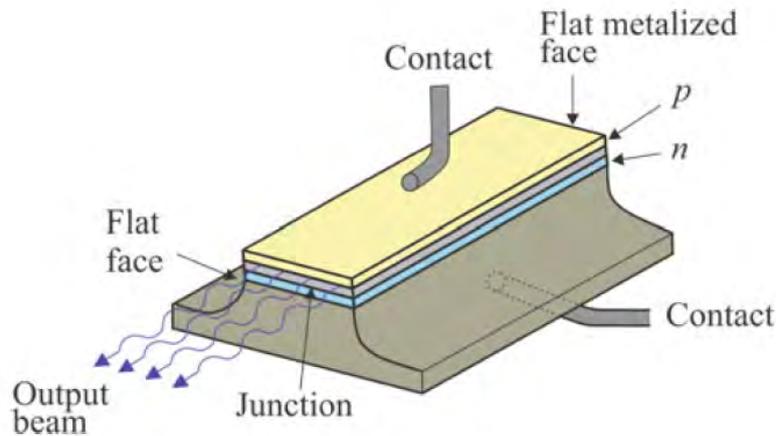


Figura 2.2: Representação de um laser de junção p-n. Fonte: (REZENDE, 2015).

Estes dispositivos são fundamentais na Optoeletrônica e nos sistemas de comunicação óptica e servem como base de operação de amplificadores ópticos de fibra, lasers de fibra e lasers de estado sólido (REZENDE, 2015).

O funcionamento de um laser de semicondutor se baseia na amplificação óptica através da emissão estimulada pela transição entre bandas devido à alta concentração (confinamento) de portadores na banda de condução do semicondutor, que deve ter energia de *gap* direto e pode ser de junção *p-n* ou heterojunção. Na ausência de um estímulo externo (um corrente elétrica, que é uma opção comum de excitação), a banda de valência do semicondutor está cheia e a banda de condução, vazia; através de uma corrente elétrica adequada controlada por um *driver* ou através de bombeamento óptico inserido no sistema, com energia ligeiramente acima da energia de *gap* do material semicondutor, os elétrons começam a transicionar da banda de valência para a banda de condução, possibilitando o surgimento de buracos na banda de valência. Elétrons no fundo da banda de condução se recombinam com buracos no topo da banda de valência, emitindo, assim, fótons com energia próxima do *gap* do material (REZENDE, 2015).

Por necessitar de uma corrente de bombeio menor que os lasers de homojunção, além de possuir menor perda de fótons no processo de emissão estimulada, os lasers de heterojunção são preferíveis para a maior parte das aplicações; neles, a presença de diferentes

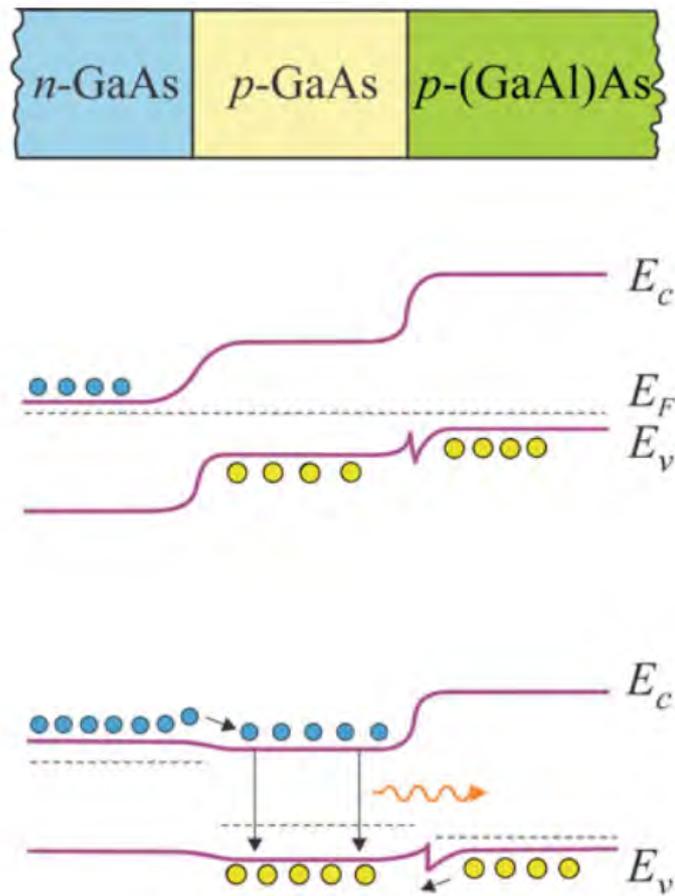


Figura 2.3: Representação unidimensional de um laser de heterojunção (superior); diagrama de energia das bandas de valência e de condução na situação de equilíbrio (centro); diagrama de energia para o caso de polarização direta (inferior). Fonte: (REZENDE, 2015).

materiais semicondutores com *gaps* diferentes faz surgir uma barreira de potencial na junção, que possibilita o confinamento de portadores e de fótons numa região fina da estrutura, contribuindo para a otimização da recombinação de pares elétrons-buraco e, conseqüentemente, para o processo de emissão estimulada e ganho do laser (REZENDE, 2015).

A Figura 2.4 - que ilustra as bandas espectrais de operação de alguns lasers - é pertinente na escolha da fonte óptica pois relaciona alguns parâmetros importantes na qualidade da transmissão em um sistema PoF: (i) a atenuação da fibra; (ii) as regiões de operação das fontes ópticas de acordo com o comprimento de onda do laser e; (iii) a responsividade (ou eficiência) do conversor ou célula fotovoltaica utilizada.

Fontes ópticas situadas por volta de $\lambda \approx 800$ nm são interessantes para o uso em

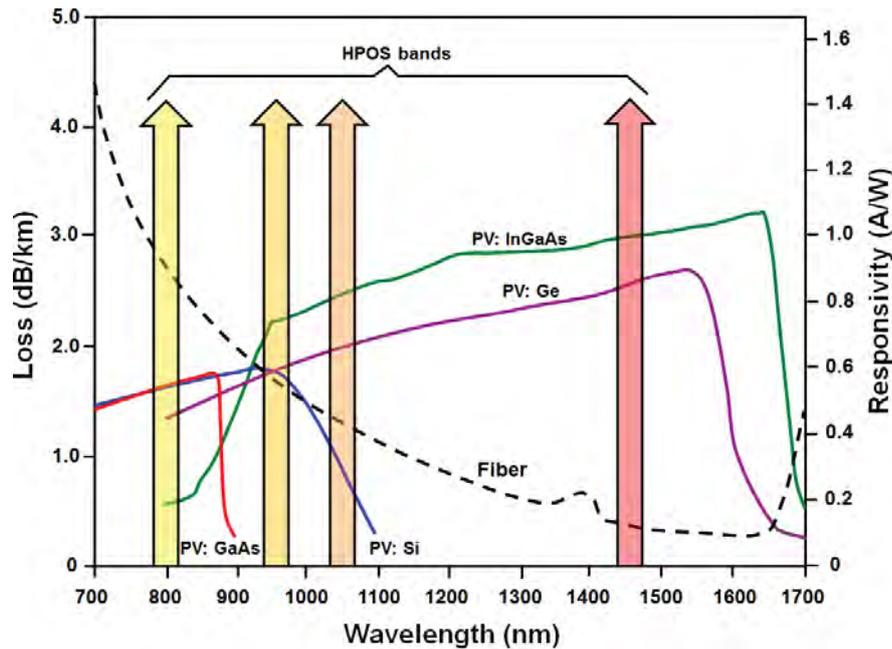


Figura 2.4: Diagrama de bandas espectrais de um sistema *Power-over-Fiber*, que relacionam parâmetros importantes em um projeto desse tipo: as perdas ópticas (em dB/km); a responsividade dos conversores fotovoltaicos (em A/W) de acordo com seu material de fabricação e do comprimento de onda λ ; e a região de operação de fontes ópticas em função do comprimento de onda da radiação emitida. A linha tracejada representa a atenuação da fibra em função do comprimento de onda e da região espectral. Fonte: (ROSOLEM, 2017).

PoF pois os lasers que operam neste comprimento de onda são utilizados em aplicações médicas, por exemplo, e possuem um custo acessível para serem empregados num sistema PoF, comparados com fontes que operam em outros comprimentos de onda. As fontes centralizadas em $\lambda \approx 980$ nm e $\lambda \approx 1050$ nm têm perfil voltado para bombeamento, uso em amplificadores ópticos e também aplicações médicas, tornando-se opções viáveis também para aplicações PoF (ROSOLEM, 2017). Por fim, a região situada em aproximadamente $\lambda \approx 1480$ nm é especialmente utilizada em lasers de bombeamento Raman e EDFAs (*Erbium-Doped Fiber Amplifiers*) e constituem os lasers mais potentes utilizados em *Power-over-Fiber*, próprios para a utilização em *links* de maior distância.

Além de ser empregado em sistemas *Power-over-Fiber* e na Medicina, esse tipo de laser é também utilizado em armazenamento óptico, bombeio de lasers de estado sólido, impressão térmica, metrologia, entre outras aplicações (CARDONA, 2022).

2.3 Fibra óptica

Excluindo-se por ora a presença de outros dispositivos típicos de um sistema de alimentação elétrica por fibra óptica, como conversores eletro-ópticos ou moduladores, o elemento seguinte ao HPLS em um sistema PoF é a fibra óptica, que representa o canal físico de comunicação entre a unidade de controle e a unidade remota.

Uma fibra óptica é uma estrutura formada por dois cilindros concêntricos, confeccionados com materiais dielétricos diferentes: na parte mais externa, tem-se a capa ou camada protetora, que oferece proteção térmica, mecânica e contra outras adversidades; na camada mais interna, que envolve o núcleo, tem-se a casca da fibra - ou acrilato - que é composta por um material dielétrico com índice de refração ligeiramente menor que o índice de refração do material do núcleo (que é, em geral, a sílica transparente), de modo que o fenômeno de reflexão total interna seja fisicamente possível e resulte no confinamento da luz dentro da fibra e a sua conseqüente propagação (CARDONA, 2022).

Há dois critérios importantes de acordo com os quais as fibras ópticas podem ser classificadas: o primeiro, que diz respeito aos modos de propagação da luz na fibra, está relacionado à frequência de corte normalizada da fibra; assim, segundo este critério, as fibras podem ser monomodo (SMF), ou seja, admitem apenas um modo de propagação da luz - ou multimodo (MMF). Os diferentes modos de propagação da luz em um meio condutor são soluções das Equações de Maxwell para os campos eletromagnéticos na fibra. Comercialmente, devido ao claro custo-benefício, a maioria absoluta dos *links* ópticos instalados são compostos por fibras SMF (KEISER, 2010).

A segunda classificação diz respeito ao perfil do índice de refração dos materiais da casca e do núcleo: se o núcleo da fibra possuir índice de refração constante, mas na região de interface com a casca esse índice cai abruptamente, então a fibra é classificada como *fibra de salto de índice*; porém, se o índice de refração da fibra não é constante, sendo máximo na região central do núcleo e diminui à medida que a distância radial aumenta - do eixo central em direção à casca - então tem-se uma *fibra de índice gradual* (KEISER, 2010).

Um parâmetro importante das fibras ópticas é a atenuação (ou perda), que é uma

medida da degradação do sinal óptico de lançamento na fibra, desde o seu lançamento até a saída no fim do link de transmissão. A atenuação é um dos fatores limitantes na transmissão por fibra óptica, seja de dados ou potência, e possui forte dependência com o comprimento do link óptico (AGRAWAL, 2010).

Como ilustração disso, retornando à Figura 2.4, pode-se constatar que a região do espectro de bombeamento que possui menor atenuação é a situada por volta de $\lambda \approx 1480$ nm. Esse comprimento de onda em lasers de bombeamento geralmente é utilizado em longas distâncias de transmissão, que num sistema PoF corresponde a não mais que alguns quilômetros.

Outra alternativa são as fibras de múltiplos núcleos (MCF), que podem ser utilizadas em *links* PoF e possibilitam a transmissão de potência e dados no mesmo cabo óptico, em núcleos dedicados ou compartilhados. Devido aos múltiplos núcleos, a capacidade de transmissão de potência das fibras MCF é maior, comparadas às fibras SMF, porém menor que a capacidade das fibras MMF, por possuir área total menor da soma dos núcleos (MATSUURA, 2022).

Para se realizar uma escolha ótima do tipo de fibra e as características da fonte óptica a serem utilizados no projeto, deve-se levar em conta o comprimento desejado do link; minimiza-se, dessa forma, as perdas envolvidas na transmissão por fibra. No início do desenvolvimento de sistemas de alimentação elétrica por fibra óptica, buscando-se a transmissão máxima de potência, fibras MMF, que possuem diâmetro do núcleo maior, foram adotadas (SOUZA, 2023). Porém, sua efetividade se restringia a distâncias curtas devida à alta atenuação. Assim, para links curtos, em geral menores que 1km de extensão, é preferível o uso de fibras MMF, que não sofrem severamente com os efeitos da atenuação e dispersão óptica: nas fibras MMF, o alargamento temporal dos pulsos ópticos que causam a dispersão é mais severo que no alargamento que ocorre nas fibras monomodo pois as diferentes velocidades associadas aos diversos modos de propagação dentro da fibra fazem com que os pulsos ópticos se alarguem com maior rapidez, intensificando, assim, o efeito de dispersão (AGRAWAL, 2010).

Devido a sua extensa disponibilidade de *links* na rede óptica existente ao redor do

mundo e ao seu custo benefício associado, as fibras SMF têm o maior potencial de serem empregadas em topologias de alimentação elétrica por fibra. As fibras monomodo também são as mais utilizadas pois sofrem muito menos influência dos efeitos de atenuação óptica e dispersão intermodal em comparação com fibras multi-modo, considerando caminhos ópticos longos (KEISER, 2010).

Uma limitação que pode ocorrer na transmissão por fibra é a capacidade máxima de transmissão de potência óptica; este limite surge, especialmente, devido a características próprias das fibras SMF, como diâmetro reduzido do núcleo, que resulta em efeitos ópticos causados pelo aumento da densidade de potência na fibra (MATSUURA, 2022), causando aquecimento excessivo, localizado e contínuo, como o *fiber fuse*, que será abordado mais à frente. Outra consequência de se transmitir altas potências é a degradação do revestimento da fibra devido ao calor gerado na transmissão, causando uma diminuição na vida útil da estrutura da fibra óptica. Todos esses fatores contribuem para a limitação de potência capaz de ser transmitida pela fibra.

2.4 Conversores fotovoltaicos

Fotodetetores são dispositivos que têm como principal objetivo a conversão de um sinal óptico em um sinal elétrico através da absorção de fótons. Para a maior parte das aplicações, um fotodetector ideal deve possuir certas características desejáveis, como alta sensibilidade, alta largura de banda de responsividade, baixo ruído, baixo custo e alta confiabilidade. Um fotodiodo é um tipo específico de fotodetector (REZENDE, 2015).

Na prática, conversores (ou células) fotovoltaicos (PVCs), que são elementos vitais na estrutura principal de um sistema de alimentação por fibra óptica, podem ser representados por um ou mais fotodiodos que operam no modo fotovoltaico (SOUZA, 2023). Em geral, tem-se na etapa de conversão não apenas um conversor ou célula, mas uma associação entre dois ou mais, usualmente em série ou paralelo (CARDONA, 2022). No processo de conversão óptica-elétrica, a luz monocromática incidente - que possui determinado comprimento de onda - vinda da fibra excita o fotodiodo, causando a formação de pares elétron-buraco e, assim, gerando uma corrente elétrica, denominada *fotocorrente*

(I_{ph}). No processo de detecção e conversão, o fotodiodo se comporta como uma junção p-n cuja corrente tem duas componentes: a corrente de escuro (I_d , ver equação 2.5) e a corrente produzida nominalmente pela geração de pares elétrons-buraco causada pelos fótons absorvidos nas proximidades da junção p-n (I_L), que pode ser conferida na equação 2.1 abaixo (REZENDE, 2015):

$$I_L = \frac{\eta e P_{in} \lambda}{hc} \quad (2.1)$$

onde η é a eficiência quântica de conversão, que é a razão entre o número de pares elétron-buraco gerados e o número de fótons incidentes-absorvidos (KEISER, 2010) e depende tanto do *bandgap* do material de fabricação do fotodiodo quanto do comprimento de onda da radiação incidente (ver equação 2.4); P_{in} é a potência óptica incidente na área efetiva da junção; λ é o comprimento de onda da radiação incidente; h é a constante de Planck ($h \approx 6,6 \times 10^{-34} J.s$), e é a carga fundamental do elétron ($e \approx 1,6 \times 10^{-19} C$) e c é a velocidade da luz no vácuo ($c \approx 3 \times 10^8 m.s^{-1}$).

$$\eta = \frac{I_{ph}/e}{P_{in}/h\nu} \quad (2.2)$$

Utilizando

$$c = \lambda\nu \quad (2.3)$$

Tem-se

$$\eta = \frac{hcI_{ph}}{\lambda e P_{in}} \quad (2.4)$$

A corrente de escuro existe independentemente do fenômeno de absorção dos fótons e da conseqüente geração de pares elétrons-buraco e é dependente da corrente saturação reversa (I_s) e da tensão da junção:

$$I_d = I_s \left(e^{\frac{eV}{k_B T}} - 1 \right) \quad (2.5)$$

onde T é a temperatura da junção, κ_B é a constante de *Boltzmann* ($\kappa_B \approx 1,38 \times 10^{-23} J.K^{-1}$), V é a tensão da junção e I_s é a *corrente de saturação reversa* da junção, dada por

$$I_s = eA \left(\frac{D_p}{L_p} p_{n0} + \frac{D_n}{L_n} n_{p0} \right) \quad (2.6)$$

onde A é a área da seção transversal da junção e D_p , D_n , L_p , L_n , p_{n0} e n_{p0} são parâmetros do semicondutor.

A fotocorrente resultante na saída do fotodiodo tem a direção da polarização reversa; logo, é dada por:

$$I_{ph} = I_d - I_L \quad (2.7)$$

O desempenho de um fotodiodo é, frequentemente, avaliado pela responsividade \mathfrak{R} . Essa grandeza está relacionada à eficiência quântica por

$$\mathfrak{R} = \frac{I_{ph}}{P_{in}} = \frac{\lambda \eta e}{hc} \quad (2.8)$$

Como citado anteriormente, ao adentrar em um conversor fotovoltaico, a luz monocromática vinda do link de fibra óptica é convertida em energia elétrica, que pode ser utilizada para alimentar a unidade remota, os sensores e dispositivos periféricos de monitoramento presentes nela. Circuitos eletrônicos podem ser empregados junto aos PVCs para prover potência elétrica a uma tensão adequada para as aplicações de interesse (SOUZA, 2023). Usualmente, um conversor fotovoltaico possui maior eficiência de conversão ao ser estimulado com radiação monocromática, em oposição ao estímulo com a radiação solar. Isso se deve ao fato de que pode-se escolher a banda de *gap* do material semicondutor que constitui a célula fotovoltaica para que case com a região espectral na qual o laser de alta potência do início do sistema está operando (CARDONA, 2022); para uma observação melhor dessa eficiência, pode-se consultar novamente a Figura 2.4: para a região em torno de $\lambda \approx 800-900$ nm, PVCs fabricados com arseneto de Gálio (GaAs) possuem melhor responsividade (ver equação 2.8) em comparação com PVCs de Germânio (Ge)

ou de arseneto de Índio e Gálio (InGaAs), por exemplo; porém, nessa região a atenuação da fibra (nesse caso, SMF) é maior, o que pode configurar um contrapeso na escolha desse conversor. Por outro lado, os PVCs de silício (Si) são adequados para a operação em regiões do espectro em torno de $\lambda \approx 700\text{-}950$ nm, não sendo viáveis em bandas com comprimentos de onda maiores. Por fim, os conversores de Ge ou de InGaAs são bastante presentes na confecção de sistemas PoF de longa distância, pois possuem melhor eficiência de conversão na banda espectral de $\lambda \approx 1480$ nm (ver 2.2 e 2.3). Assim, realizando a sintonia do *gap* do semicondutor da célula fotovoltaica para a banda espectral de operação do laser de bombeamento do PoF, pode-se reduzir a atenuação do sinal de potência e os efeitos de termalização provenientes da transmissão, proporcionando, assim, maior eficiência de conversão da célula - ou células (CARDONA, 2022). Diante dessas observações, vê-se o porquê do processo de conversão óptica-elétrica representar o coração de um sistema de alimentação elétrica por fibra óptica.

2.5 Arquiteturas de sistemas de alimentação elétrica por fibra óptica

Dentro do contexto de *Power-over-Fiber*, algumas arquiteturas são tipicamente adotadas para a comunicação e transmissão de potência entre a unidade de controle e a unidade remota. A adoção de uma ou outra configuração envolve o estudo de algumas variáveis do sistema: necessidade de flexibilidade e disposição espacial do sistema, como, por exemplo, o tamanho do link de fibra óptica, o seu peso, custo de implementação e disponibilidade de material. Esses fatores influem diretamente na adoção de um ou mais *links* para a realização completa do sistema, ou seja, do estabelecimento das interfaces de potência e de dados.

Em uma primeira abordagem (ver Figura 2.5), pode-se empregar a topologia de dois *links* de fibra no sistema, em que um link é responsável exclusivamente pelo trânsito de potência no sistema, enquanto o outro é responsável pela comunicação de dados entre as duas unidades do sistema.

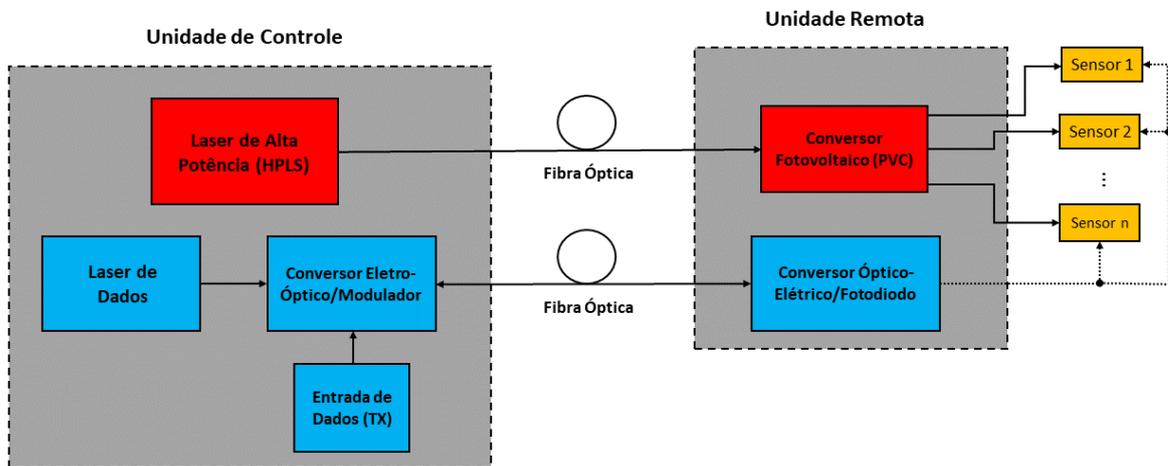


Figura 2.5: Diagrama de um sistema *Power-over-Fiber* com *links* ópticos separados para dados e potência. (Fonte: o autor.)

Nesse caso, há a necessidade de uma maior quantidade de fibra no sistema, o que, a depender da aplicação, pode se configurar como um fator limitante (ROSOLEM, 2017); por outro lado, a existência de dois *links* separados possibilita uma maior independência entre as duas transmissões em caso de falha em um deles.

Uma outra abordagem (ver Figura 2.6) utiliza a tecnologia de Multiplexação por Divisão de Comprimento de Onda (WDM), em que o sinal de dados e o sinal de potência, com comprimento de onda distintos $\lambda_D \neq \lambda_P$, são enviados simultaneamente na mesma fibra a partir da unidade de controle e, ao chegar na unidade remota, são separados e utilizados em seus propósitos específicos (SOUZA, 2023).

A depender do sentido do fluxo de dados no sistema, lasers de dados e conversores eletro-ópticos (células fotovoltaicas, fotodiodos) podem estar situados tanto na Unidade de Controle quanto na Unidade Remota. Em geral, o laser de alta potência (HPLS) fica localizado na Unidade de Controle, enquanto conversores eletro-ópticos são alocados na Unidade Remota. Se a comunicação for bidirecional, pode-se optar pelos modos de transmissão *full-duplex* (CARDONA, 2022), onde o fluxo de dados entre as unidades de controle e remota é bidirecional e simultâneo ou *half-duplex*, em que a comunicação é

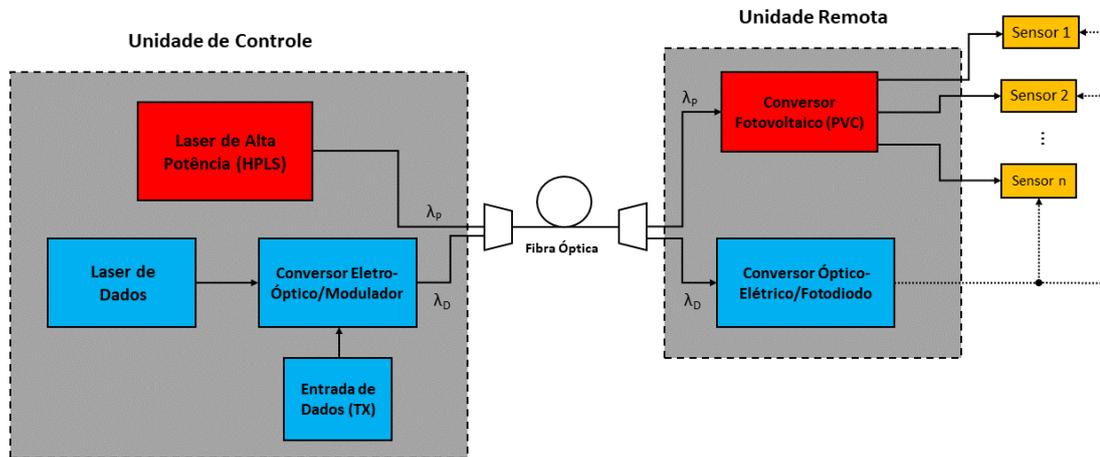


Figura 2.6: Diagrama de um sistema *Power-over-Fiber* no qual o sinal óptico de potência e o sinal de dados são trafegados na mesma fibra, através da tecnologia WDM. (Fonte: o autor.)

bidirecional, mas não simultânea.

Vale ressaltar que estas não são as únicas configurações usadas em sistemas PoF; por exemplo, outras arquiteturas, como a híbrida e a direta, podem ser exploradas em trabalhos mais complexos sobre o tema. Ver (SOUZA, 2023).

2.6 Fenômenos ópticos

Alguns efeitos de natureza óptica podem surgir devido à propagação da luz na fibra e, muitas vezes, são críticos para a qualidade do sinal, podendo inclusive resultar em sua perda completa. Esses efeitos podem ser conferidos nas subseções a seguir.

2.6.1 Atenuação

A atenuação é um dos efeitos mais comuns que podem ocorrer na propagação da luz por uma fibra óptica. As perdas ópticas se caracterizam pela degradação da potência do sinal que chega ao receptor, sendo um fator que influencia diretamente na qualidade da transmissão. É fortemente dependente do comprimento de onda da luz transmitida (AGRAWAL, 2010), fator que pode limitar o comprimento do link de transmissão no

projeto. Um parâmetro importante na análise da atenuação é o coeficiente de atenuação (α), presente na seguinte expressão:

$$P_e = P_s e^{-\alpha L} \quad (2.9)$$

Onde P_e é a potência lançada na entrada da fibra, P_s é a potência de saída e L é o comprimento da fibra.

Porém, o coeficiente de atenuação (AGRAWAL, 2010) é comumente expresso em unidades de dB/km, segundo a expressão:

$$\alpha(dB/km) = -\frac{10}{L} \log_{10}\left(\frac{P_s}{P_e}\right) \approx 4,343\alpha \quad (2.10)$$

E ganha a denominação de parâmetro de perda da fibra. Fibras tradicionais monomodo de sílica possuem atenuação mínima na região de comprimentos de onda próximos de $1,55 \mu\text{m}$ (AGRAWAL, 2010).

2.6.2 Absorção material

O fenômeno de absorção está relacionado ao processo em que impurezas presentes em um material absorvem energia dentro de sua estrutura. Isso ocorre sob determinadas condições, como certos comprimentos de onda que correspondem às ressonâncias eletrônicas e vibracionais associadas a moléculas específicas (AGRAWAL, 2010).

A absorção pode ser de dois tipos: *intrínseca*, que corresponde à absorção causada pela interação da luz com a própria estrutura da sílica fundida, utilizada no processo de fabricação da fibra óptica; e *extrínseca*, que é resultante da presença de impurezas na fibra, como metais de transição, que absorvem fortemente na faixa de $0,6 \mu\text{m}$ a $1,6 \mu\text{m}$ (AGRAWAL, 2010). Outra fonte comum de absorção em fibras modernas é o íon OH presente no vapor d'água, responsável pela ressonância vibracional nas proximidades de $2,73 \mu\text{m}$ e que produz harmônicos de absorção nos comprimentos de onda $1,39 \mu\text{m}$, $1,24 \mu\text{m}$ e $0,95 \mu\text{m}$. Felizmente, técnicas modernas proporcionam a fabricação de fibras que buscam atenuar esses efeitos, como a fibra seca (*dry fiber*), que diminui a concentração

do íon OH a níveis que chegam a quase anular os efeitos de absorção (AGRAWAL, 2010).

2.6.3 Espalhamento Rayleigh

O espalhamento é um fenômeno óptico em que uma onda que se propaga em uma determinada direção interage com uma ou mais partículas imersas no meio e perde energia na direção principal de propagação, espalhando parte da energia em outras direções. O espalhamento pode ser de natureza linear ou não-linear: no caso linear, a frequência da onda espalhada é inalterada; já no espalhamento não-linear, a onda sofre um deslocamento em sua frequência e geralmente é causado por campos elétricos de alta potência dentro da fibra (Fiber Optics For Sale Co., 2023).

O espalhamento Rayleigh é o caso mais comum de espalhamento linear e tem origem em flutuações microscópicas locais de densidade de moléculas de sílica no processo de fabricação da fibra; essas partículas se movem de modo aleatório quando a sílica está no estado fundido e, após o processo de fabricação, as diferenças de densidade aleatórias levam a flutuações aleatórias do índice de refração da fibra (AGRAWAL, 2010). Quando a luz atravessa e se espalha num meio deste tipo, ocorre o fenômeno de espalhamento Rayleigh. No comprimento de onda usual de $1,55 \mu\text{m}$, as perdas são dominadas pela influência desse tipo de espalhamento (AGRAWAL, 2010). À medida que o comprimento de onda vai aumentando, a influência do espalhamento Rayleigh vai diminuindo; porém, vai dando lugar a outros efeitos degradantes do sinal na fibra, como a absorção de infravermelho a partir de $1,6 \mu\text{m}$ (AGRAWAL, 2010).

2.6.4 Espalhamento Raman Estimulado (SRS) e Espalhamento de Brillouin Estimulado (SBS)

Outra classe de efeitos ópticos são os efeitos não-lineares, que podem interferir na qualidade da transmissão por fibra sob certas condições, como a presença de campos eletromagnéticos intensos. Dentre os efeitos não-lineares, destaca-se, para o caso da fibra óptica, o efeito de Espalhamento Estimulado da Luz; diferentemente do espalhamento linear, como o espalhamento Rayleigh, no espalhamento estimulado a frequência da luz

espalhada é deslocada para baixo. Espalhamentos desse tipo são também chamados de espalhamentos inelásticos (AGRAWAL, 2010). Dois tipos de espalhamento estimulado notáveis são o de Raman e o de Brillouin.

Para ambos os casos, a luz (a uma alta potência óptica) incidente na forma de um fóton, ao interagir com os modos vibracionais de uma estrutura cristalina de um material, se divide entre um fóton de menor energia e um fônon (que é um modo de vibração do material), após o espalhamento. No caso do espalhamento Raman, este fônon é de natureza óptica, enquanto no espalhamento Brillouin o fônon emitido é acústico. Ambos os fenômenos resultam numa perda de potência na frequência incidente. No caso de baixos níveis de potência lançada na fibra, esses efeitos são desprezíveis; porém, para *links* de alta potência, os efeitos se tornam influentes na qualidade de transmissão (AGRAWAL, 2010).

O espalhamento Raman estimulado é o princípio por trás da amplificação Raman, em que o meio de transmissão (fibra) é utilizado como um amplificador quando altas potências ópticas são propagadas na fibra, na região de 1260-1650 nm (KEISER, 2010). Em contrapartida a outros tipos de amplificadores ópticos, como os tradicionais EDFAs, que necessitam de uma fibra especialmente construída para sua operação, o amplificador Raman pode ser implementado em qualquer tipo de fibra (Cisco Systems, Inc., 2023).

2.6.5 *Fiber Fuse*

Um efeito de extrema importância para sistemas PoF é o *fiber-fuse*, que também é consequente da propagação de sinais de alta potência na fibra óptica. O efeito se caracteriza pelo surgimento de uma região localizada e de alta temperatura na fibra, que se propaga em toda sua extensão emitindo radiação na região visível (ROSOLEM, 2017); com isso, o efeito se propaga em cadeia e um padrão de bolhas que percorre toda a área afetada pode ser observado (ver Figura 2.7) após o sinal de alta potência e temperatura se propagar, deixando a fibra irreversivelmente destruída e incapaz de transmitir sinais ópticos (ROSOLEM, 2017).

A explicação mais aceita para o efeito de *fiber fuse* é o aumento do fenômeno de

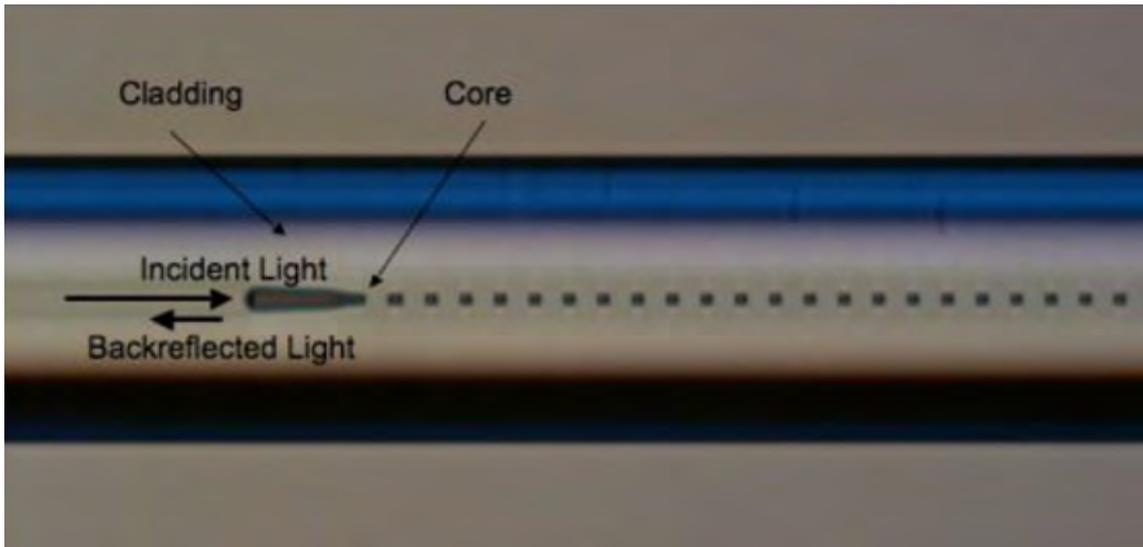


Figura 2.7: Danos causados pelo efeito de *Fiber Fuse* em uma fibra óptica SMF. Fonte: (CARDONA, 2022).

absorção na fibra em um ponto de alta temperatura no núcleo da fibra, que por sua vez leva a um aumento de temperatura acima do ponto de vaporização da sílica. O efeito em cadeia é gerado através do mecanismo de difusão térmica, que transmite que a zona localizada de alta temperatura percorra regiões vizinhas, até chegar à fonte óptica (ROSOLEM, 2017).

É importante frisar que ignição do efeito de *fiber fuse* é causada se a potência óptica for mantida acima de um determinado valor crítico, que, em geral, é proporcional ao diâmetro modal da fibra (MDF) e ao comprimento de onda do sinal propagante (ROSOLEM, 2017). Como exemplo, uma fibra monomodo típica (com MDF = $7,8 \mu\text{m}$) apresenta um valor crítico de potência de 1.5 W a 1467 nm (ROSOLEM, 2017). Além disso, a condição de temperatura elevada também é necessária para que o efeito se estabeleça na fibra.

A ocorrência do efeito pode ser propiciada em regiões do link onde há a junção de conectores ópticos contaminados com sujeira ou resíduos na região de contato entre eles; dobras abruptas com diâmetros reduzidos também contribuem para o aumento da atenuação e para a criação de zonas localizadas de aquecimento na fibra.

2.7 Outros componentes e ferramentas

Nesta seção, alguns componentes e ferramentas auxiliares são apresentados e constituem importantes elementos que são levados em consideração neste trabalho.

2.7.1 Acoplador óptico

Acopladores ópticos são dispositivos usados tanto para dividir sinais ópticos coerentemente em vários caminhos ou para fazer o inverso, ou seja, combinar vários sinais em um só caminho. Acopladores direcionais são dispositivos de quatro terminais, em que a luz incidente em duas portas de entrada é dividida em duas portas de saída de acordo com uma razão κ (COELHO, 2010). Acopladores ópticos podem ser fabricados com fibra de sílica, niobato de lítio ($LiNbO_3$) ou outros materiais semicondutores. Os campos elétricos na saída do acoplador estão relacionados ao(s) campo(s) elétrico(s) de entrada através de

$$\begin{bmatrix} E_{1,out}(t) \\ E_{2,out}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{\kappa} & j \cdot \sqrt{1-\kappa} \\ j \cdot \sqrt{1-\kappa} & \sqrt{\kappa} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{1,in}(t) \\ E_{2,in}(t) \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

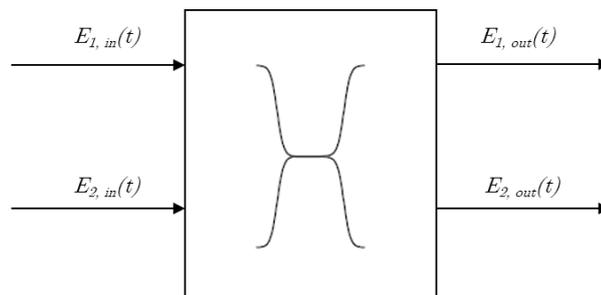


Figura 2.8: Acoplador óptico com duas entradas e duas saídas. (Fonte: o autor.)

2.7.2 Modulador *Mach-Zehnder* (MZM)

Existem duas técnicas principais para se codificar a informação numa portadora óptica: via modulação direta ou via modulação externa. Na modulação direta, a saída do laser é diretamente modulada ao se variar a corrente de injeção de entrada; já na modulação externa, laser é polarizado com uma corrente de injeção constante e um modulador externo é usado para converter o sinal elétrico em um sinal óptico modulado em um determinado tipo de modulação. A técnica de modulação direta oferece um melhor custo-benefício e possui menor complexidade no transmissor, porém o *chirp* de frequência causado pela corrente de modulação limita a performance do sistema a partir de taxas de transmissão maiores que 5 Gbits/s (COELHO, 2010).

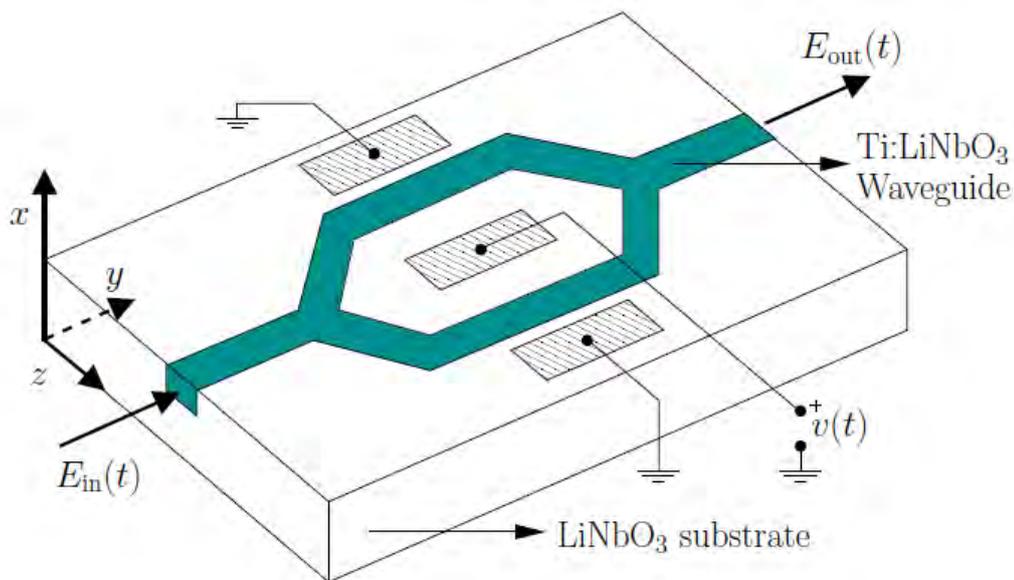


Figura 2.9: Modulador *Mach-Zehnder*. Fonte: (COELHO, 2010).

Assim, para *links* de alta performance, a modulação externa é amplamente adotada devido a vantagens como a alta largura de banda, balanço de potência consideravelmente melhor e menor influência de efeitos advindos do uso do laser, como o *chirp*, *clipping* e saturação. O tipo mais comum de modulador externo usado em sistemas de comunicação óptica é o modulador de *Mach-Zehnder*, no qual o princípios do interferômetro de *Mach-Zehnder* e do efeito eletro-óptico linear em materiais compostos por $LiNbO_3$ são aplicados na modulação (COELHO, 2010). Tipicamente, um substrato de niobato de lítio contendo

átomos de titânio (Ti) em difusão é utilizado como guia de onda para modular a luz propagante. A presença dos átomos de Ti provoca um aumento no índice de refração de $\sim 0,01$, formando, assim, um guia de onda. A maior eficiência de modulação é alcançada quando o campo elétrico do sinal de dados e o campo elétrico da portadora óptica estão paralelos ao eixo z do cristal (COELHO, 2010).

2.7.3 Rádio Definido por software (SDR)

Um rádio definido por software (*SDR, Software-Defined Radio*) é um sistema de radiocomunicação no qual quase todas as funcionalidades associadas à camada física da rede são implementadas em software, utilizando técnicas e algoritmos de processamento digital de sinais (WYGLINSKI et al., 2018). Um SDR é capaz de processar, de forma dedicada, um sinal recebido e realizar sua modulação/demodulação, sincronização e decodificação através de software, a fim de recuperar a informação. Os SDRs são reconhecidos por sua praticidade e capacidade de configuração rápida e dinâmica, sendo dispositivos rapidamente atualizáveis e capazes de receber vários sinais de rádio ao mesmo tempo (WYGLINSKI et al., 2018).

Rádios definidos por software são encontrados tanto como *hardwares* acessíveis e utilizados em aplicações educacionais e *hobistas* - na forma de pequenos dispositivos USB de fácil aquisição, "*dongles*" - quanto como rádios mais robustos e com complexidade maior, que é o caso deste trabalho (ver Figura 3.7).

Em geral, a utilização de um SDR para transmissão e/ou recepção de sinais de radiofrequência é acompanhada de um ambiente composto por um computador equipado com uma ferramenta de processamento de dados, sendo o *GNU Radio* o software mais difundido e utilizado. Trata-se de uma ferramenta de software útil e poderosa, munida de uma interface gráfica e que será abordada melhor a seguir.

2.7.4 GNU Radio

O *GNU Radio* é uma ferramenta gratuita e *open-source* que, através do uso de blocos de processamento de sinais, implementa sistemas de rádio definido por software de maneira

prática e flexível (GNU Radio Project, 2023). Sendo uma das ferramentas mais usadas para o projeto e desenvolvimento de SDRs, seu código-fonte é feito em *C++* e a plataforma possui extensões para utilizar aceleradores em hardware a fim de maximizar o desempenho dos algoritmos de DSP e permitir o processamento de sinais em tempo real. Possui interfaces de software disponíveis em *Python*, permitindo a customização e expansão de bibliotecas e blocos de processamento, algo que é feito de forma ativa pela comunidade de usuários da plataforma. Utilizando o *GNU Radio*, um projeto envolvendo SDR pode ser feito inteiramente através de diagrama de blocos através da interface gráfica *GNU Radio Companion*. Dentro desse ambiente, sistemas podem ser implementados puramente com simulações ou podem também ser implementados através da conexão com *hardware* de RF externo: como citado anteriormente, pequenos rádios de custo acessível (*dongles*) podem ser adquiridos para a recepção de sinais RF e visualização com auxílio do *GNU Radio*. Estudos e projetos envolvendo a plataforma não são restritos apenas a ambientes acadêmicos, sendo o *GNU Radio* amplamente utilizado também por *hobistas* e na indústria (GNU Radio Project, 2022).

Capítulo 3

Desenvolvimento

ESTE capítulo tem como objetivo apresentar o núcleo deste trabalho: a proposta e montagem experimental de um sistema de alimentação elétrica por fibra óptica elementar, com o objetivo de validar o estudo do tema através de uma transmissão de potência e de dados em laboratório, utilizando componentes próprios de um sistema PoF e buscando-se avaliar o potencial de fornecimento de potência elétrica ao fim do link.

Inicialmente, o sistema proposto é apresentado e detalhado; em seguida, os componentes, materiais e equipamentos utilizados em sua montagem são descritos; a implementação do sistema é abordada logo em seguida, incluindo também a caracterização de alguns componentes; por fim, são apresentados os resultados observados dessa montagem, a fim de serem avaliados no Capítulo 4, que trata da conclusão do estudo.

3.1 Sistema proposto

Um diagrama do sistema proposto é mostrado na Figura 3.1.

O sistema de alimentação elétrica por fibra óptica, que é o principal objetivo deste trabalho, foi montado e testado no Laboratório de Fotônica do Departamento de Eletrônica e Sistemas, na Universidade Federal de Pernambuco, e possui duas interfaces: uma interface para alimentação, que utiliza um laser de alta potência para fornecer energia a uma unidade remota; e uma interface de dados, utilizando um laser DFB para realizar a transmissão entre as duas unidades, com o auxílio de um modulador externo Mach-Zehnder

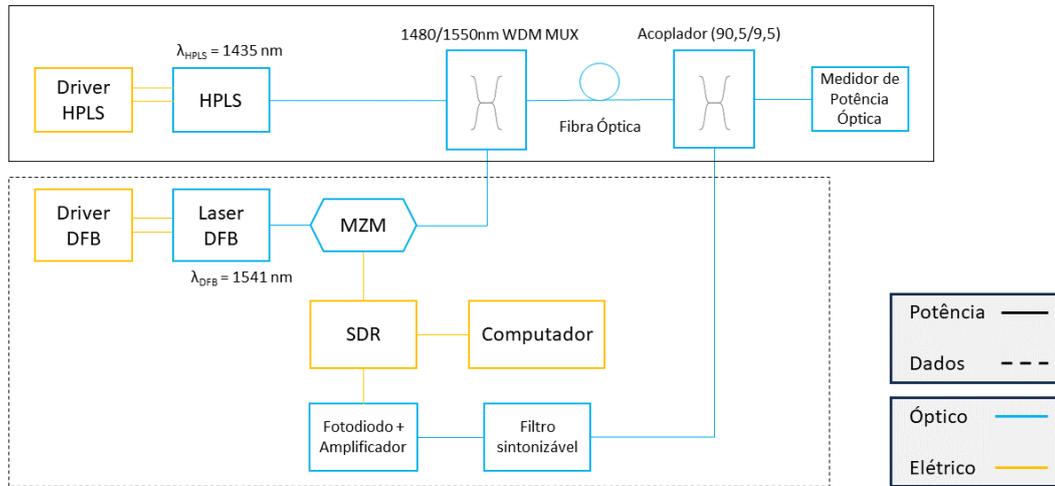


Figura 3.1: Diagrama representativo do sistema de alimentação elétrica por fibra óptica montado em laboratório. (Fonte: o autor.)

(MZM), um SDR, um fotodiodo e um amplificador óptico através de um esquema de rádio sobre fibra (RsF). Ambos os lasers são controlados por fontes de corrente e temperatura que realizam o ajuste da potência óptica de saída. Um computador é utilizado para realizar a transmissão e recepção do sinal de RF através do software GNU Radio e do SDR acoplado ao sistema.

Um laser de bombeio acessível (ver Figura 3.5), de uso comercial e operando na faixa de 1440 nm é utilizado como o HPLS. Este laser é alimentado por uma fonte de corrente e entrega potência a um MUX WDM óptico. Na outra entrada deste MUX, tem-se a saída da interface de dados do sistema: o sinal é enviado do computador para o SDR, que, com o auxílio de um laser DFB de dados operando na faixa de 1541 nm e do modulador externo, realiza a transmissão de um sinal RF de 3,5 GHz, com modulação QPSK, a uma taxa de 50 Mbits/s.

Estes dois lasers e seus componentes auxiliares se configuram como a Unidade de Controle do sistema. Após ambos os sinais ópticos serem lançados na mesma fibra monomodo através do MUX, um acoplador óptico presente no fim do link divide a potência em duas vias: em uma delas, de cerca de 90,5% da potência óptica é utilizada para a alimentação

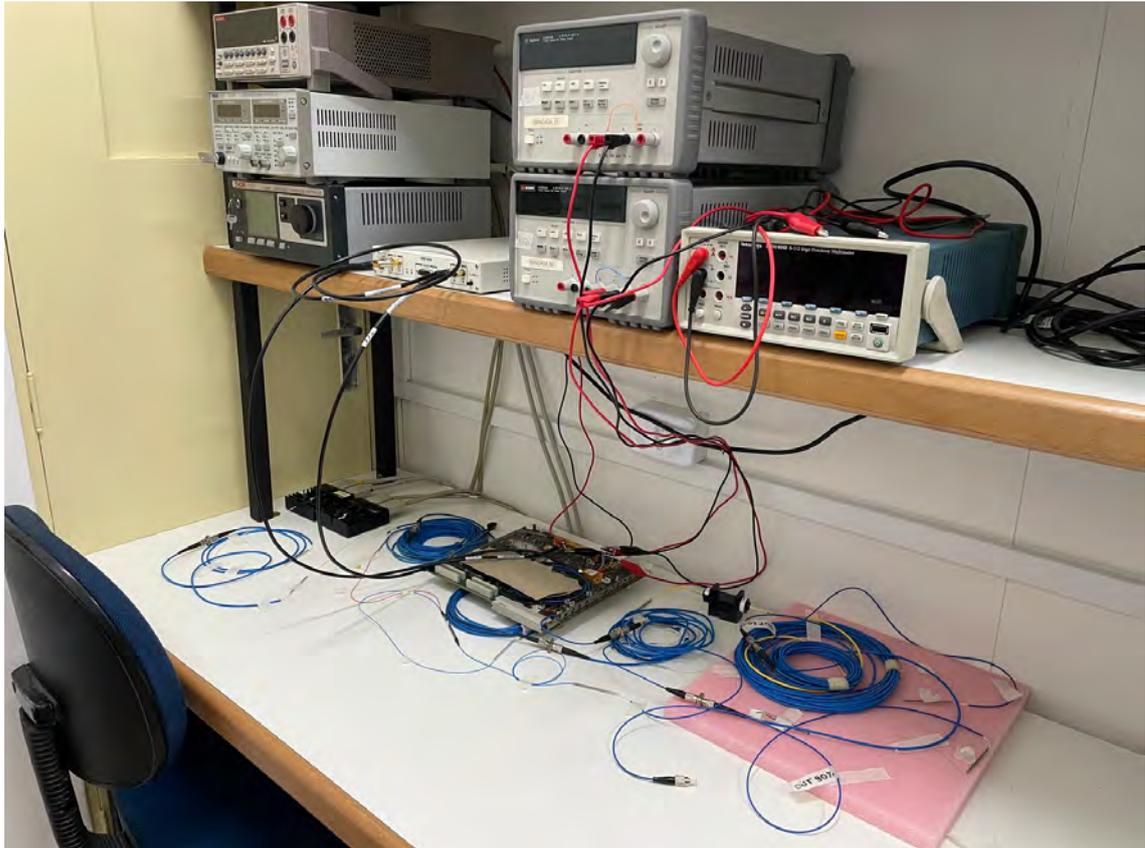


Figura 3.2: Sistema de alimentação elétrica por fibra óptica montado em laboratório. (Fonte: o autor.)

elétrica no fim do link. Nesse ponto, é utilizado um medidor de potência óptica para se avaliar o potencial de fornecimento de potência elétrica a dispositivos de monitoramento, considerando a eficiência de conversão de um conversor fotovoltaico comercial.

Devido às limitações e condições nas quais o experimento foi realizado, para se testar a transmissão de dados na fibra, o mesmo SDR foi utilizado tanto para transmissão quanto recepção de dados no sistema. Assim, os 9,5% restantes da potência de saída do segundo acoplador foram direcionados para a entrada do SDR, passando antes por um caminho composto por um filtro óptico, um fotodiodo e um amplificador óptico; de volta ao SDR, o sinal de RF é então enviado ao computador e, com o auxílio do GNU Radio, a taxa de erro de *bit* (BER) pode ser calculada, medida que é utilizada para se avaliar a qualidade da transmissão de dados no sistema.

3.2 Componentes e equipamentos utilizados

Nesta seção, uma descrição mais detalhada dos componentes do sistema é apresentada, assim como sua caracterização e especificações técnicas.

3.2.1 Laser de alta potência (HPLS)



Figura 3.3: Laser de alta potência utilizado no trabalho, acomodado numa estrutura *butterfly*. (Fonte: o autor.)

Como laser de bombeio de alta potência, foi utilizado um laser de diodo S34 Series 14xx, da JDS Uniphase, com comprimento de onda selecionável entre 1420 nm e 1510 nm. O laser utilizado possui comprimento de onda específico de $\lambda_{HPLS} = 1435,4$ nm. Seguindo um padrão industrial com encapsulamento do tipo *butterfly* e com um conector *pigtail* ligado a uma fibra mantenedora de polarização (PMF), é um laser ideal para aplicações envolvendo amplificação Raman, podendo fornecer uma potência nominal de até 450 mW (na faixa de 1420 nm a 1465 nm). Possui alta eficiência térmica, operação robusta em alta potência e um termistor, um diodo de monitoramento e um sistema de

resfriamento integrados.

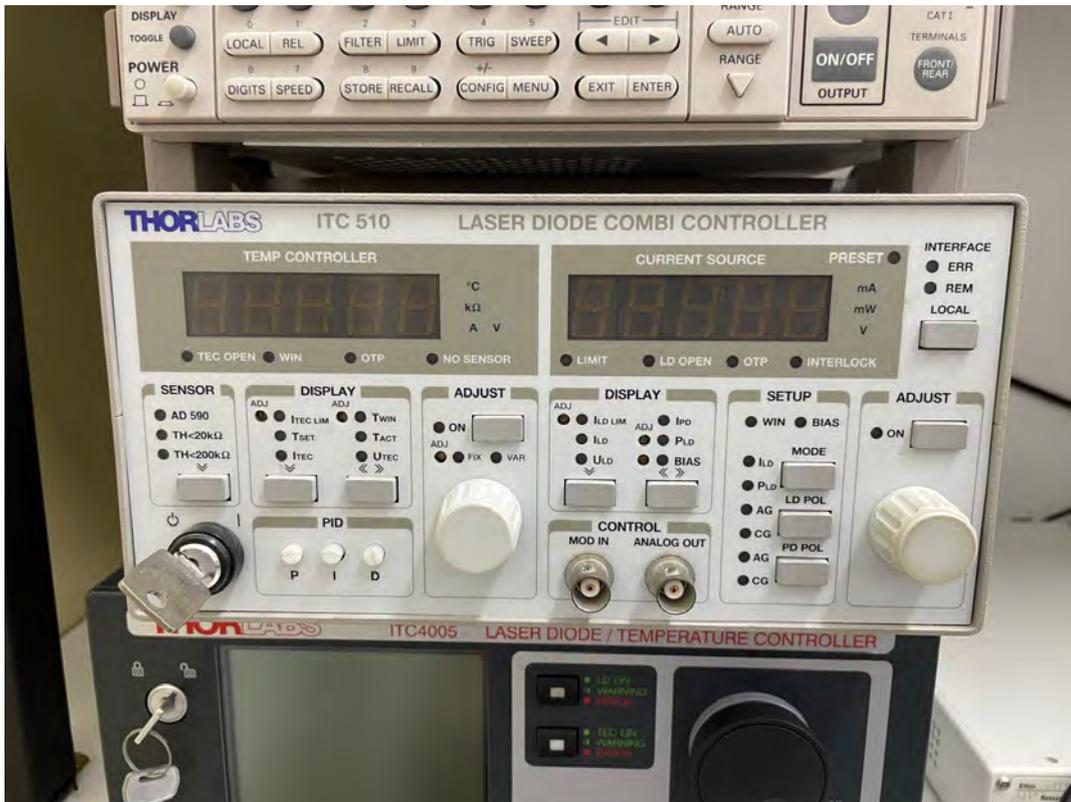


Figura 3.4: Controlador de corrente e temperatura utilizado para o ajuste da potência de saída do laser de diodo de bombeio (HPLS). (Fonte: o autor.)

Juntamente com o laser de potência, foi utilizado um *laser current driver*, que é um dispositivo de controle para a corrente injetada no laser e para temperatura de operação; seu modelo é o ITC 510 (*Laser Diode Combi Controller*), da ThorLabs (ver Figura 3.4).

Um detalhe relevante sobre a escolha do comprimento de onda do laser de bombeio é sua localização otimizada no espectro: o comprimento de onda de 1440 nm estão próximo de 1550 nm, ou seja, está menos suscetível aos efeitos de atenuação, ao passo que não está dentro da banda C (1530-1565 nm) a ponto de ocorrer o efeito de *crossstalk* entre os comprimento de onda do HPLS e do laser DFB. Assim, mesmo a altas potências, esse efeito é desprezível e não é observado.

3.2.2 Laser DFB

Como fonte óptica de dados, foi utilizado um laser DFB da família D2525P, fabricado pela *Lucent Technologies*, de comprimento de onda selecionado. Essa família de lasers

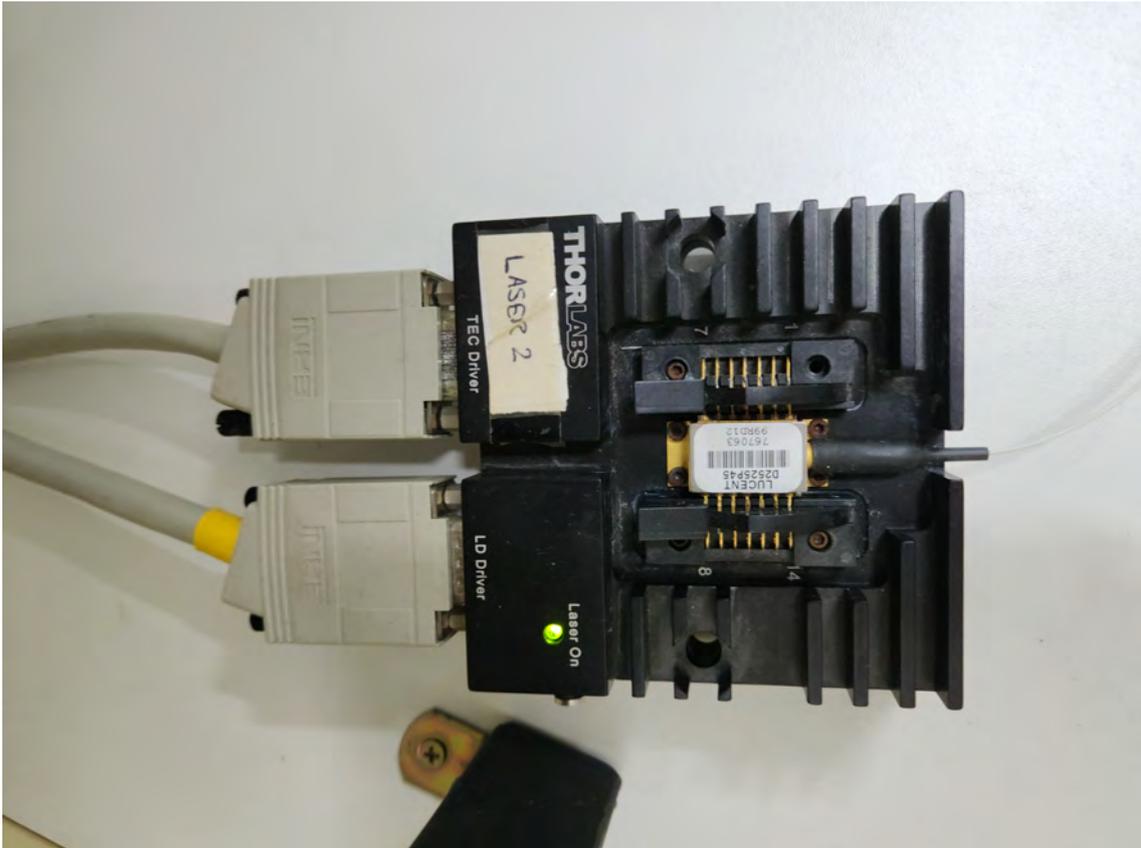


Figura 3.5: Laser DFB utilizado no trabalho, acomodado numa estrutura de apoio *butterfly*. (Fonte: o autor.)

foi projetada para ser usada idealmente com um modulador externo de niobato de lítio ($LiNbO_3$), como o modulador externo *Mach-Zehnder* que é utilizado neste trabalho. O módulo laser vem equipado com uma fibra mantenedora de polarização (PMF) com conexão *pigtail*, possibilitando a conexão direta do laser com o modulador, sem a necessidade de um controlador de polarização. O laser tem a capacidade de fornecer até 10 mW de potência óptica de saída. A fibra PMF mantém a polarização da luz proveniente do laser numa orientação consistente, o que possibilita o uso desse laser como uma fonte de luz contínua (CW light source) para sistemas que requerem níveis extremamente baixos de *chirp*. Além das já citadas, outras características do laser incluem: isolador óptico integrado, estrutura de apoio do tipo *butterfly* com 14 pinos e padrão industrial de fabricação, alta confiabilidade e largura espectral estreita. O laser utilizado é o modelo D2525P45 e, segundo seu *datasheet*, esse laser opera em um comprimento de onda pré-definido de $\lambda_{DFB} = 1541.35 \pm 0.04$ nm.

Similarmente ao laser de potência, foi utilizado para controle do laser DFB um *laser current driver*, modelo ITC4005 (*Laser Diode Current and Temperature Controller*), da ThorLabs (ver Figura 3.6).



Figura 3.6: Controlador de corrente e temperatura utilizado para o ajuste de potência de saída do laser DFB de dados no sistema. (Fonte: o autor.)

3.2.3 SDR USRP X310

O rádio definido por software utilizado como transceptor de dados no sistema foi o *Universal Software Radio Peripheral USRP X310* da *Ettus Research*. O equipamento conta com uma FPGA Xilinx Kintex-7 XC7K410T, duas *daughterboards* independentes, conversores analógico-digital de 14-bits e conversores digital-analógico de 16-bits. O rádio é capaz de operar em uma frequência de até 6 GHz, além de oferecer múltiplas interfaces de alta velocidade, permitindo que o dispositivo opere com altas taxas de dados, sendo possível operar com até 200 mil amostras por segundo (Ettus Research, 2023). Para a programação e configuração do rádio, o software GNU Radio foi utilizado.



Figura 3.7: Rádio Definido por software USRP X310 utilizado no trabalho. (Fonte: o autor.)

3.2.4 Modulador óptico *Mach-Zehnder*

Para a modulação do sinal de dados transmitido através da fibra, foi utilizado um modulador externo *Mach Zehnder*, produzido pela JDS Uniphase, modelo OC-192 Modulator 10150-002180. Esse dispositivo é capaz de operar com uma taxa de até 10 GBit/s e foi projetado especificamente para atender ao requisitos das taxas de transmissão óptica OC-192.

Para alimentar a tensão de *bias* do modulador *Mach-Zehnder*, foi utilizado o multímetro/fonte de corrente e tensão integrados da *Keithley*, série 2400, presente na bancada do experimento (ver Figura 3.9).

3.2.5 Fotodiodo

Para a detecção do sinal óptico de dados vindo da fibra, foi utilizado um fotodetector PIN, modelo PP-10G fabricado pela Nortel Networks (ver Figura 3.8). Este dispositivo é um detetor de InGaAs de alta velocidade, baixa capacitância, encapsulado juntamente com um amplificador de trans-impedância de GaAs com baixo ruído. O fotodetector possui largura de banda de até 11 GHz, um conector do tipo *pigtail* de fibra monomodo como

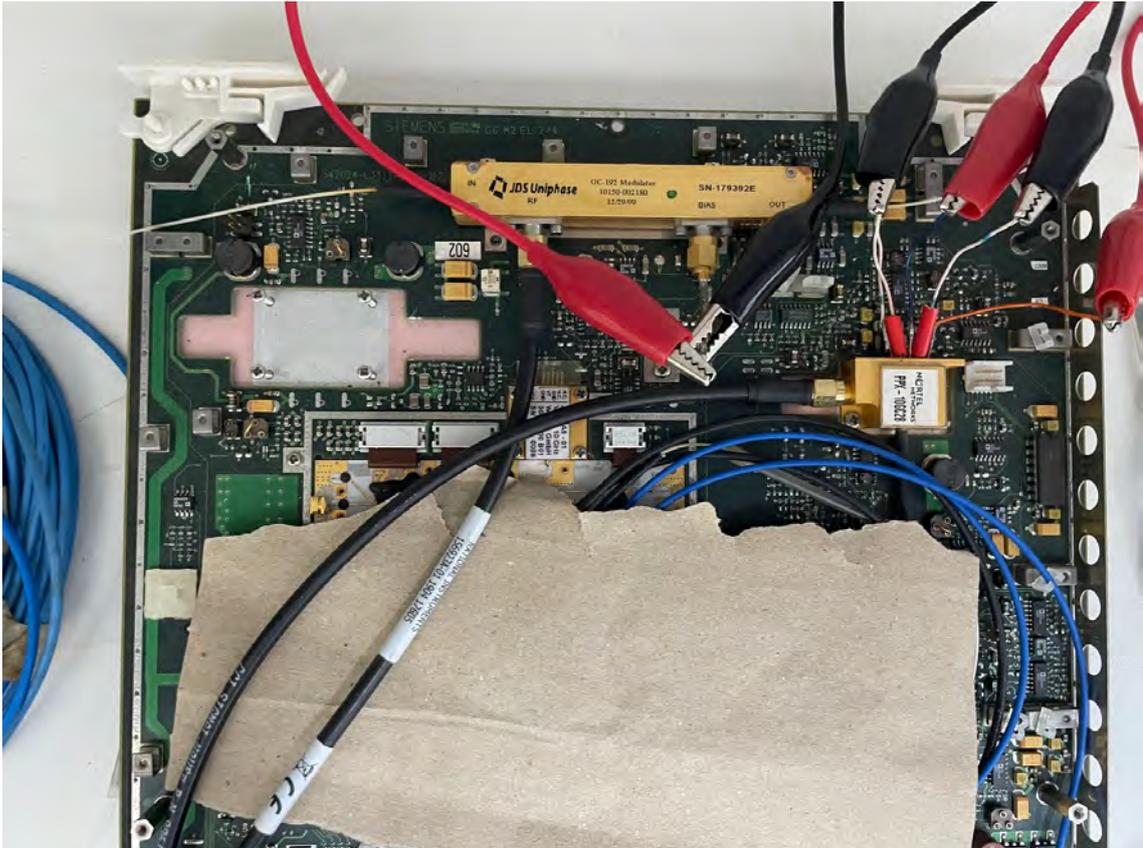


Figura 3.8: Modulador externo *Mach-Zehnder* e fotodetector PIN com amplificador integrado. (Fonte: o autor.)



Figura 3.9: Imagem frontal do experimento montado em bancada no laboratório de Fotônica, na qual é possível se observar o sistema completo; em especial, destaque para as fontes de tensão e *sourcemeter* utilizados na polarização do modulador externo. (Fonte: o autor.)

entrada e um conector elétrico do tipo SMA na saída, com impedância de 50Ω (Nortel Networks, 2023).

3.2.6 Filtro sintonizável

Um filtro sintonizável, fabricado pela AMS Tehcnologies (ver Figura 3.10) , foi utilizado no sistema para rejeitar a potência relativa ao comprimento de onda do HPLS, ou seja, nas redondezas de 1435 nm. Essa medida foi adotada para proteger a entrada do fotodiodo PIN contra possíveis danos causados pela alta potência do laser Raman. Esse filtro possui como características: largura de linha estreita, alto alcance de comprimentos de onda a serem filtrados, alta resolução e insensibilidade ao tipo de polarização da luz incidente. Além disso, ele está disponível para fibras monomodo, multi-modo e mantenedoras de polarização. Neste estudo, foi empregado um filtro para fibras monomodo.



Figura 3.10: Filtro sintonizável utilizado no trabalho. (Fonte: o autor.)

Trata-se de um filtro passa-faixa de largura estreita, possuindo um ajuste manual do ângulo de incidência entre o feixe luminoso e o filtro (AMS Technologies, 2023).



Figura 3.11: Multiplexador óptico WDM que recebe os sinais de dados e potência com diferentes comprimentos de onda e realiza a multiplexação na mesma fibra. (Fonte: o autor.)

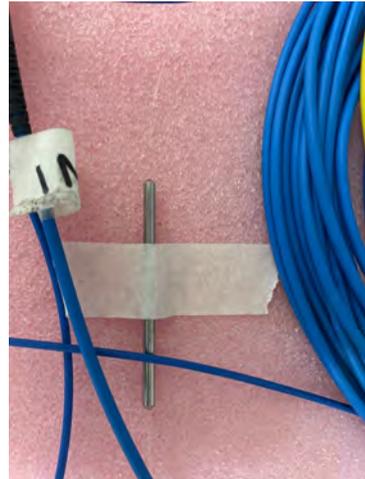


Figura 3.12: Acoplador óptico na saída do link de fibra SMF, que separa a luz em dois caminhos ópticos: um para dados e outro para fornecimento de potência. (Fonte: o autor.)

3.2.7 Multiplexador WDM

Um multiplexador (MUX) WDM, fabricado pela empresa G&H, foi utilizado para concentrar os sinais de dados e potência para a transmissão pelo link de fibra. Possui capacidade de combinar sinais com comprimentos de onda na faixa de 1470-1480 nm e 1540-1555 nm (banda C), podendo comportar até 4 W de potência óptica e possuindo uma perda por inserção da ordem de 0,5 dB, no máximo (ver Figura 3.11).

3.2.8 Acoplador óptico

O acoplador óptico utilizado na montagem do sistema (ver Figura 3.12), fabricado pela OPNETI, é confeccionado com fibra SMF-28e e algumas de suas especificações incluem: operação nos comprimentos de onda 1310-1550 nm e razão de acoplamento e perdas por inserção descritas segundo a tabela abaixo:

Operating Wavelength (nm)	Lead mark	Coupling Ratio	Insertion Loss (dB)	PDL (dB)	Directivity (dB)
1310	Out 1	90.6 %	0.56	0.02	≥ 55
	Out 2	9.4 %	10.42	0.10	
1550	Out 1	90.5 %	0.54	0.01	≥ 55
	Out 2	9.5 %	10.34	0.18	

Tabela 3.1: Especificações do acoplador óptico utilizado. (Fonte: Opneti Communications Co Ltd.).

Como os comprimentos de onda das fontes ópticas estão na faixa de 1440-1550 nm, a

razão de acoplamento adequada para esta faixa foi de de 9.5 %/90.5 % para as interfaces de dados/potência, respectivamente. Além disso, por ser *dual-band*, o acoplador possui, tipicamente, perdas pequenas de acoplamento.

3.2.9 Fibra óptica

Um carretel de fibra óptica monomodo padrão de cerca de 1,83 km de extensão foi utilizado como link de fibra do sistema, ligando as fontes ópticas à saída do sistema.

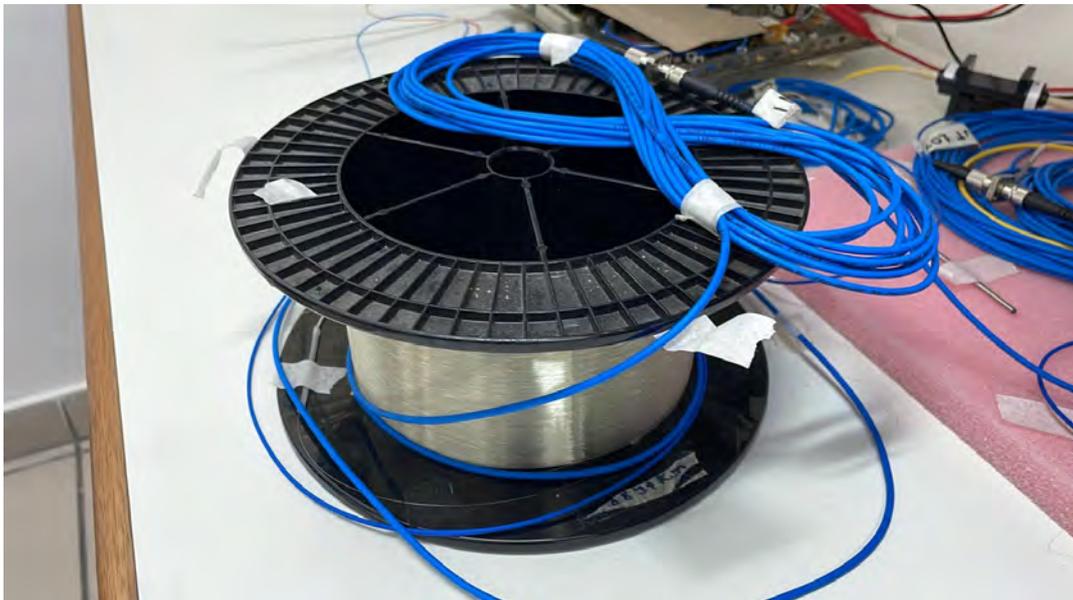


Figura 3.13: Fibra óptica SMF utilizada no sistema. (Fonte: o autor)

3.2.10 Medidor de potência óptica

As medidas de potência dos sinais ópticos do sistema foram realizadas, em maior parte, através de um medidor de potência óptica mostrado na Figura 3.14.

3.2.11 Cordões de fibra óptica

Cordões de fibra SMF (ver Figura 3.15) foram utilizados no projeto para facilitar conexões. Trata-se de uma solução prática, apesar de oferecer maior perda por inserção no sistema, comparada a emendas de fibra. Possuem conexão FC/PC em ambas as suas terminações e uma perda por inserção tipicamente menor que 0,5 dB.



Figura 3.14: Medidor de potência óptica utilizado no trabalho. (Fonte: o autor.)

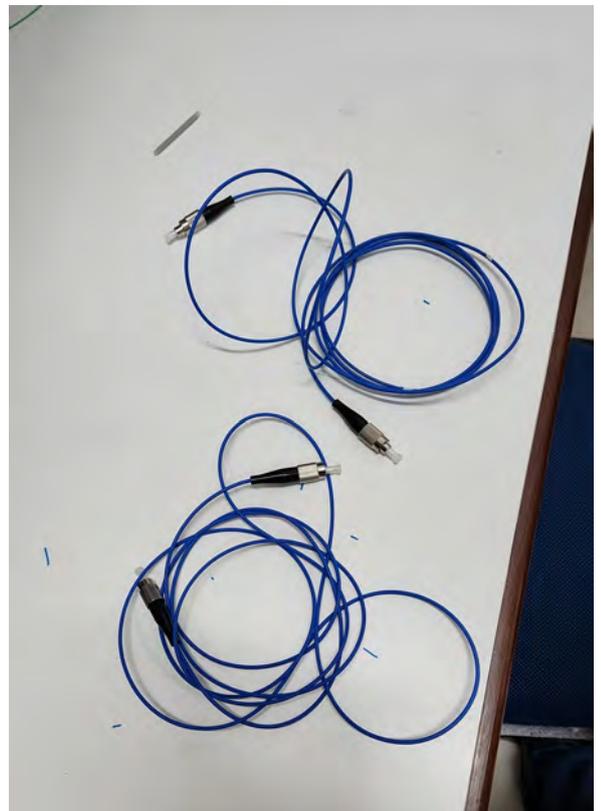


Figura 3.15: Cordões de fibra mono-modos (SMF). (Fonte: o autor.)

3.3 Metodologia e experimentos

Os experimentos em laboratório, utilizando os materiais e dispositivos citados anteriormente, foram conduzidos através de algumas etapas, que serão detalhadas a seguir.

No início do processo, a preparação de alguns componentes foi feita da seguinte forma: instrumentos auxiliares, como um alicate e uma máquina de corte ("*splitter*"), foram utilizados para realizar a preparação das extremidades de fibra a serem fundidas. Álcool isopropílico e o microscópio de um refletômetro (OTDR), modelo MT9083B2 da Anritsu, foram utilizados para verificar que os conectores dos cordões de fibra estavam livres de impurezas (ver Figura 3.16). Após isso, as emendas (*splices*) de fibra foram realizadas utilizando uma máquina de fusão e os cordões de fibra foram utilizados para conectar o laser de potência ao MUX WDM e para conectar o laser DFB de dados ao modulador Mach-Zehnder.



Figura 3.16: Refletômetro no domínio do tempo (OTDR) utilizado no trabalho. (Fonte: o autor.)

Após o restante dos componentes ser integrado aos elementos iniciais do sistema, definiu-se alguns pontos de caracterização para se avaliar o balanço de potência do sistema e com o objetivo final de se avaliar a potência na saída do acoplador óptico. Neste ponto específico, procurou-se avaliar a potência elétrica disponível para alimentar dispositivos de baixo consumo, considerando um conversor fotovoltaico comercial e sua eficiência típica,

tópico que será abordado mais à frente.

Por fim, um analisador de espectro óptico (OSA) foi utilizado para se observar o espectro dos sinais das fontes ópticas nos pontos de interesse da caracterização. O resultados estão registrados nas seções seguintes, além de análises referentes a eles.

3.3.1 Caracterização do sistema

Na etapa de caracterização, buscou-se avaliar o ponto de operação dos componentes listados na seção anterior. Trata-se de uma etapa de extrema importância no processo de modelagem experimental, visto que é neste passo que tem-se uma visão mais aprofundada do funcionamento e do comportamento do sistema. Na caracterização, pode-se também detectar comportamentos adversos ou não esperados do sistema mediante diferente cenários de operação.

Além da caracterização, alguns pontos foram utilizados para se coletar medidas de potência de interesse para os objetivos do trabalho. Essa tarefa foi executada mediante duas configurações principais, detalhadas a seguir.

No primeiro cenário, presente na Figura 3.17, desligou-se o controlador de temperatura e corrente do laser DFB de dados; assim, utilizou-se apenas o laser de bombeio para fornecer potência ao sistema e foram considerados os pontos a seguir, destacados também no diagrama da Figura 3.17:

- A_1 : Saída do HPLS;
- B_1 : Saída do MUX WDM;
- C_1 : Saída da fibra;
- D_1 : Saída de 90,5% do acoplador óptico (potência);
- E_1 : Saída de 9,5% do acoplador óptico (dados);
- F_1 : Saída do filtro sintonizável.

No primeiro ponto, A_1 , mediu-se a potência óptica de saída do laser de bombeio, a fim de caracterizá-lo.

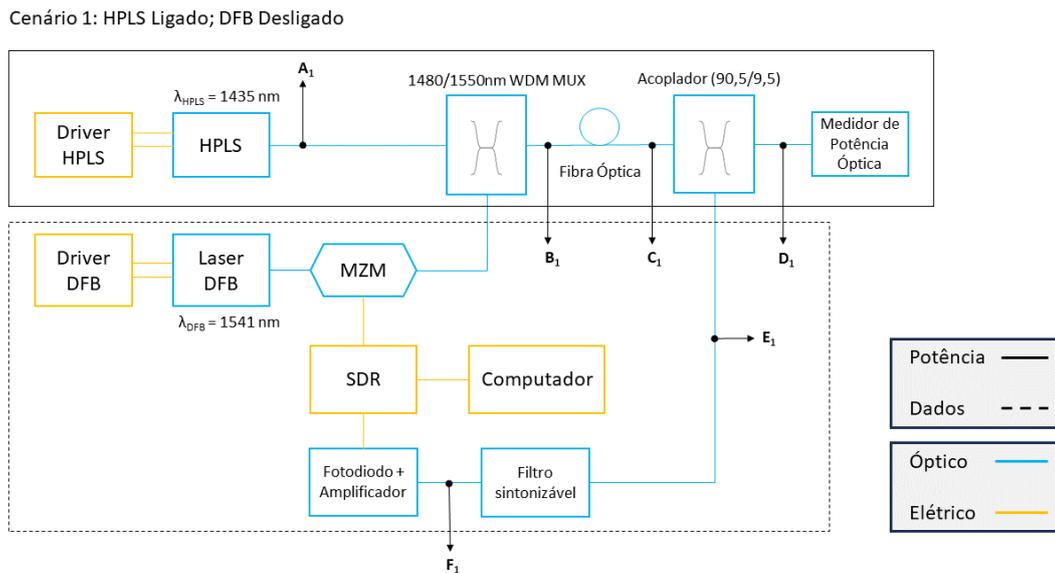


Figura 3.17: Pontos de caracterização do sistema num primeiro cenário: o laser de alta potência e seu controlador de temperatura e corrente se encontram ligados, enquanto o laser DFB e o seu respectivo controlador de temperatura e corrente estão desligados do sistema. (Fonte: o autor.)

O ponto B_1 é a saída do MUX óptico, que multiplexa os sinais de potência e dados no mesmo caminho óptico; porém, nesta configuração, como o laser DFB de dados está desligado, há apenas a contribuição vinda do laser de alta potência.

O ponto (C_1 é a saída do link de fibra e entrada do acoplador óptico, onde poderá ser avaliada a influência da atenuação causada pela fibra no balanço de potência do sistema.

O ponto D_1 é a saída de 90,5% do acoplador óptico e constitui o principal ponto de interesse do estudo, no qual será avaliado o potencial de fornecimento de potência óptica a ser convertida para potência elétrica, mediante o uso de um conversor fotovoltaico apropriado.

O ponto E_1 constitui a saída de 9,5% do acoplador óptico, onde se espera uma potência ainda considerável fornecida pela fonte de alta potência de 1435,4 nm.

Finalmente, no ponto F_1 é medida a potência óptica após o sinal passar pelo filtro sintonizável, cuja função é mitigar a luz no comprimento de onda do HPLS, ou seja, em 1435,4 nm. Assim, espera-se uma atenuação considerável neste ponto.

Numa segunda configuração, inverteu-se a configuração das fontes ópticas: o laser DFB foi ligado e o HPLS foi desligado, e os seguintes pontos de interesse para a caracterização

do sistema foram considerados (ver Figura 3.18):

- A_2 : Saída do laser DFB;
- B_2 : Saída do modulador MZM;
- C_2 : Saída do MUX WDM ;
- D_2 : Saída da fibra;
- E_2 : Saída de 9,5% do acoplador óptico (dados);
- F_2 : Saída do filtro sintonizável.

No ponto A_2 , mede-se a potência na saída de dados do laser DFB. Esse ponto constitui o equivalente do ponto A_1 e é usado para a caracterização do laser de dados.

No ponto B_2 , foi avaliada a potência óptica na saída do modulador Mach-Zehnder.

No ponto C_2 , a potência foi mensurada na saída do MUX WDM.

No ponto D_2 , avalia-se o efeito da perda no link de fibra sobre o sinal óptico de dados.

No ponto E_2 , toma-se a medida da saída de 9,5% do acoplador óptico, onde se espera uma atenuação da ordem de 10,34 dB (ver tabela 3.1).

As medidas foram realizadas utilizando-se o medidor de potência óptica da Figura 3.14. Este medidor possui uma limitação característica, na qual a sua resolução apenas permite medições de, no máximo, 3 dBm, aproximadamente. Assim, buscou-se contornar esta limitação com a inserção de um atenuador óptico no conector do medidor, a fim de se obter medidas indiretas, que não ultrapassassem os limites físicos do medidor de potência óptica. Ao final das medições, a atenuação foi subtraída dos valores de potência óptica e pode-se obter as medidas reais da potência em cada ponto considerado.

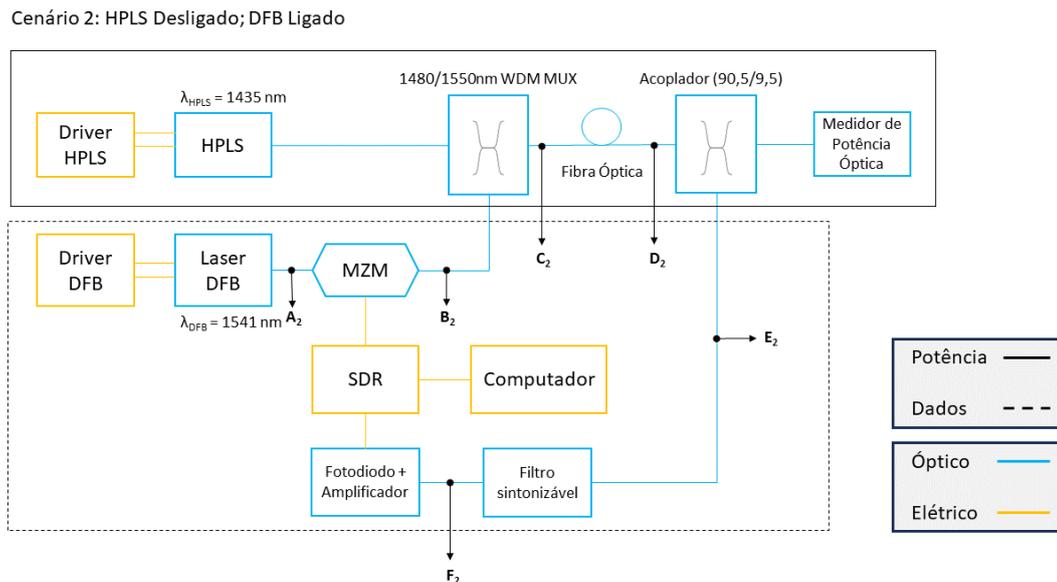


Figura 3.18: Pontos de caracterização do sistema num segundo cenário: neste caso, o laser de alta potência e seu controlador de temperatura e corrente se encontram desligados, enquanto o laser DFB e o seu respectivo controlador de temperatura e corrente são ligados. (Fonte: o autor.)

3.4 Resultados e análise

Os resultados obtidos nos experimentos são exibidos e discutidos a seguir. Inicialmente, é mostrada a caracterização das fontes ópticas, de potência e dados, que foi feita variando-se a corrente de injeção no respectivo controlador de cada laser. Em seguida, são exibidos os resultados das medições realizadas com o medidor de potência óptica. Por fim, são mostrados os espectros em torno de cada ponto de caracterização, obtidos através do uso do analisador de espectro óptico (OSA).

3.4.1 Caracterização das fontes ópticas

Para a caracterização dos lasers utilizados, foi avaliada a potência óptica nos pontos A_1 (primeiro cenário, Figura 3.17, laser de bombeio ligado) e A_2 (segundo cenário, Figura 3.18, laser DFB ligado).

No primeiro cenário, para a caracterização em A_1 , variou-se o controlador de corrente e temperatura do laser de alta potência da *JDSU*, de 50 mA até 440 mA, com passos de 10 mA. Anotou-se as medidas em cada ponto, que podem ser vistas na Tabela

Corrente de polarização (mA)	Potência óptica na saída do HPLS* (dBm)	Potência óptica na saída do HPLS (mW)
50	-25,44	0,00
80	-18,29	0,01
85	-16,73	0,02
90	-14,95	0,03
95	-12,72	0,05
100	-2,29	0,59
110	5,98	3,96
120	8,29	6,75
130	9,63	9,18
140	10,68	11,70
150	11,88	15,42
160	12,79	19,01
170	13,38	21,78
180	13,99	25,10
200	15,16	32,81
220	15,94	39,26
240	16,55	45,19
260	17,07	50,93
280	17,67	58,48
300	18,23	66,53
320	18,77	75,33
340	19,24	83,95
360	19,5	89,13
380	19,73	93,97
400	20,12	102,80
420	20,43	110,41
440	20,73	118,30

Tabela 3.2: Caracterização do laser de alta potência (HPLS) através da potência de saída, medida em função da corrente de polarização do controlador. (*Somando-se 26,64 dB do atenuador fixo.). (Fonte: o autor.)

3.2 e registradas graficamente na Figura 3.19, na qual é possível também se observar a curva padrão de fábrica do dispositivo, em $\lambda_{HPLS} = 1435,4$ nm. Comparando-se as duas curvas, assim como a Figura 3.20, há uma pequena diferença que pode ser explicada pela limitação na precisão do medidor de potência óptica e pela inserção do atenuador fixo de, aproximadamente 26,64 dB. A curva referente ao padrão de fábrica foi gerada a partir de valores disponibilizados em sua folha de dados.

Percebe-se que, a partir de uma corrente de polarização $I_{driver} = 400$ mA, é possível se obter, aproximadamente, 100 mW de potência óptica na saída do laser HPLS, que é uma medida razoável para o início dos experimentos envolvendo o sistema.

Para o ponto A_2 , a caracterização do laser DFB D2525P45 foi realizada através do OSA, no comprimento de onda $\lambda_{DFB} = 1541,35$ nm. As medidas foram realizadas com o controlador de temperatura a 55° C e foram registradas na Tabela 3.3.

Apesar de uma menor quantidade de pontos ter sido utilizada para a caracterização, pode-se observar que, com uma corrente relativamente baixa, foi possível alcançar aproximadamente metade da potência óptica nominal do laser DFB, o que representa um

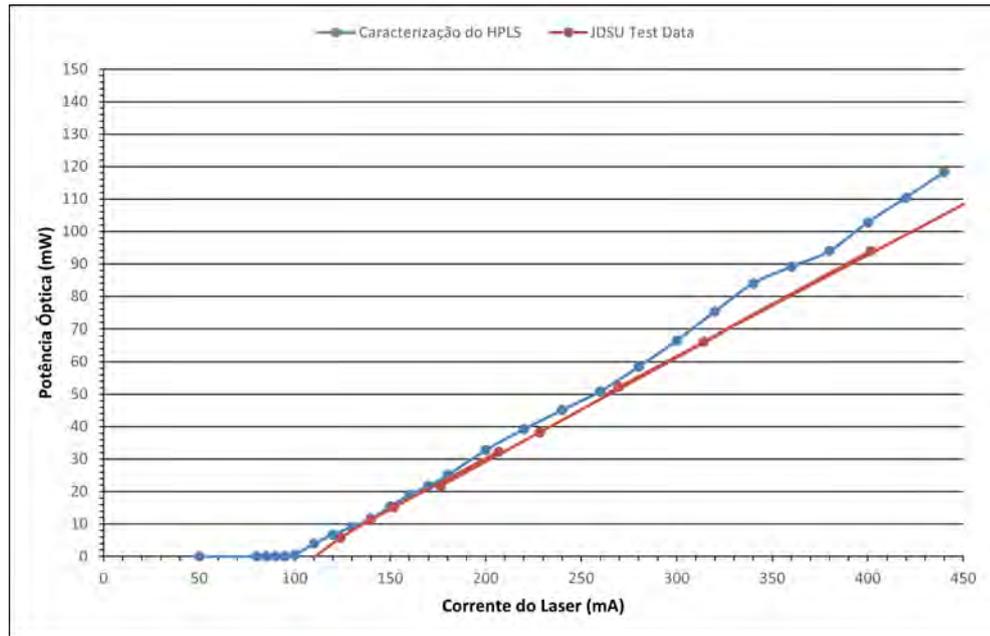


Figura 3.19: Curva de caracterização do laser de alta potência (azul); em vermelho, tem-se a curva padrão do dispositivo. (Fonte: o autor.)

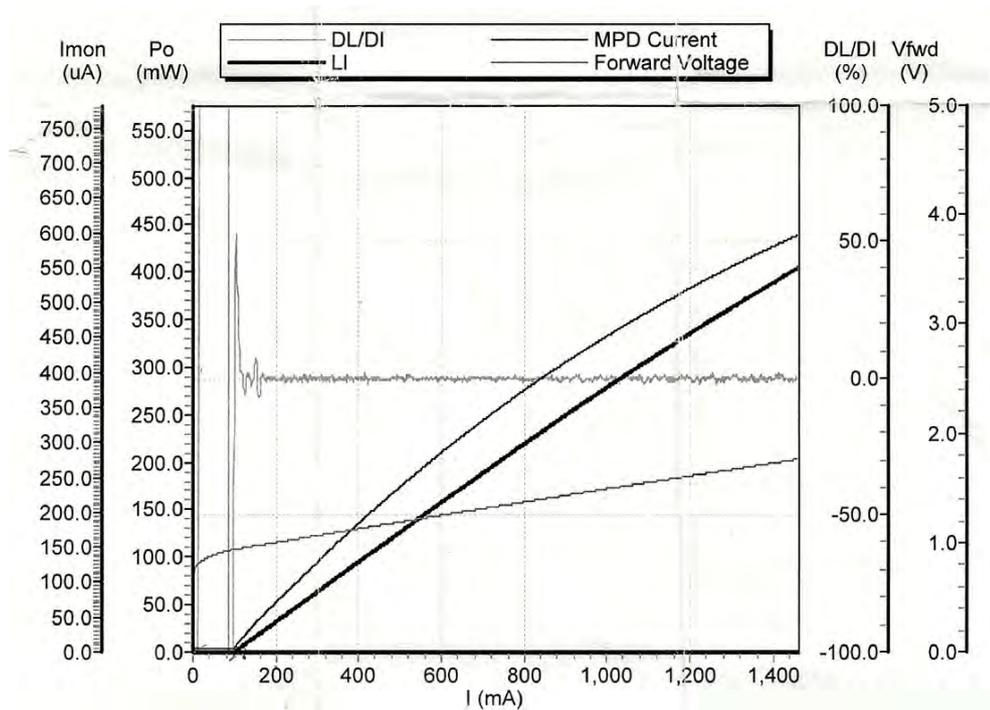


Figura 3.20: Curva de caracterização do laser, segundo o fabricante. (Fonte: JDS Uniphase Corporation).

resultado satisfatório para o estudo.

Como o enlace de transmissão de dados não é exatamente o objetivo principal do trabalho, essa potência fornecida pelo laser DFB a 1541 nm é adequada para o estudo.

Corrente de polarização (mA)	Potência óptica (dBm)	Potência óptica (mW)
30	-0,8	0,83
40	1,6	1,45
50	3,1	2,04
60	4,2	2,63
70	5,1	3,24
85	6,1	4,07
110	7,3	5,37

Tabela 3.3: Caracterização do laser DFB de dados. (Fonte: o autor.)

3.4.2 Caracterização dos demais pontos

Em seguida, mantendo-se a corrente de polarização do HPLS fixa em 400 mA, realizou-se uma série de medições de modo a registrar a potência óptica nos pontos A_1 a F_1 da Figura 3.17, utilizando o medidor de potência óptico da Figura 3.14. Os resultados são exibidos na Tabela 3.4.

Ponto de caracterização	Potência óptica* (dBm)	Potência óptica (mW)
A_1	20,13	103,04
B_1	18,96	78,70
C_1	15,97	39,54
D_1	13,46	22,18
E_1	6,11	4,08
F_1	-34,89	0,00

Tabela 3.4: Potência óptica medida nos pontos de caracterização da Figura 3.17, com o controlador de corrente do HPLS fixado em 400 mA. (*Somando-se 26,64 dB do atenuador fixo.). (Fonte: o autor.)

No ponto B_1 (saída do MUX WDM), a perda óptica foi, aproximadamente, de 1,17 dB, que é um resultado esperado, diante das perdas nominais do MUX (0,5 dB) e do cordão de fibra (0,5 dB).

No ponto C_1 (saída da fibra SMF), a potência cai aproximadamente pela metade (3 dB). Trata-se de um resultado razoável devido à atenuação mais atuante, por se tratar de um link curto de fibra monomodo.

No ponto D_1 (saída de 90,5% do acoplador óptico), que representa o ponto de maior interesse para o projeto, foi registrada uma potência da ordem de 13 dBm. Esse valor, para fins de início de testes no esquema montado, que é um protótipo, é razoável, mas não ideal. Mesmo levando-se em conta as perdas por inserção dos conectores e cordões e a perda de cerca de 0,54 dB da inserção dessa saída do acoplador (ver Tabela 3.1),

esperava-se um nível de potência um pouco maior neste ponto de medição.

Entre os pontos A_1 e D_1 existe uma perda de cerca de 6,67 dB, possivelmente devido a um erro de acoplamento ou medição em D_1 . Tomando a potência em E_1 (saída de 9,5%) como referência (6,11 dBm) e considerando a diferença entre D_1 e E_1 como 10 dB (ver Tabela 3.1), seria esperada em D_1 uma potência da ordem de 16,11 dBm. Dessa forma, a perda entre A_1 e D_1 cairia para 4,02 dB. Considerando uma atenuação na fibra de cerca de 1,52 dB e uma perda por inserção do MUX e do acoplador de cerca de 1 dB, existe uma margem de 1,5 dB de potência a ser melhorada em D_1 . Isso pode ser alcançado, dentre outras formas, eliminando-se ao máximo o uso de conectores e usando, em substituição, a fusão das fibras nesses pontos.

Em F_1 , que é o ponto após a saída do filtro sintonizável, a potência óptica registrada foi de - 34,89 dBm, ou seja, praticamente nula. Esse resultado é, de fato, satisfatório, já que a função do filtro é rejeitar a potência na região próxima do comprimento de onda do HPLS (≈ 1435 nm), de forma a evitar danos e sobrecargas na entrada do fotodetector PIN, que deve apenas detectar o sinal óptico de dados a 1541 nm.

Em um segundo momento, fez-se o mesmo procedimento, porém com a corrente de polarização do laser DFB fixa em 110 mA. Assim, foram registradas as medidas de potência óptica para os pontos A_2 a F_2 , segundo a Tabela 3.5.

Espera-se que a potência de saída do laser DFB não seja tão alta nos pontos medidos, apenas suficiente para que a transmissão e recepção do sinal QPSK ser feita de forma efetiva.

Ponto de caracterização	Potência óptica* (dBm)	Potência óptica (mW)
A_2	8,13	6,50
B_2	0,5	1,12
C_2	-2,7	0,54
D_2	-4,6	0,35
E_2	-15,6	0,028
F_2	-19,3	0,012

Tabela 3.5: Potência óptica medida nos pontos de caracterização da Figura 3.18, com o controlador de corrente do DFB fixado em 100 mA. (*Somando-se 26,64 dB do atenuador fixo.). (Fonte: o autor.)

De forma complementar à medição da potência óptica nos pontos de caracterização acima, foi registrado também o espectro em torno de cada ponto, utilizando-se o analisador

de espectro óptico. Para estas medições, o laser Raman foi mantido a 200 mA, com o laser DFB desligado; esse valor foi escolhido de forma que o sistema não fosse estressado por muito tempo com uma potência mais elevada. Por outro lado, no segundo cenário de uso do OSA, o controlador de corrente do laser DFB foi mantido em 110 mA.

Com a resolução do OSA calibrada em aproximadamente 1 nm, foi possível capturar o comportamento do espectro dos sinais de dados e potência.

Na Figura 3.21, o espectro no ponto A_1 (saída do HPLS) possui um pico principal em 1439,39 nm, que é próximo do comprimento de onda do laser, além de um segundo pico, situado em 1442,14 nm. A formação de mais um pico é reflexo da alta largura de banda do laser de bombeio, que é cerca de 2 nm.

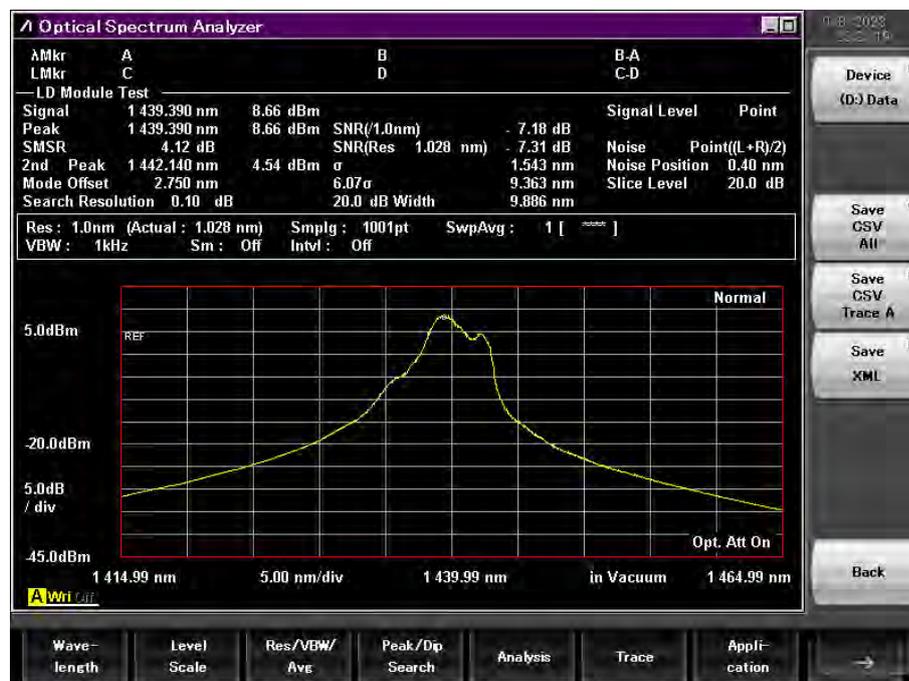


Figura 3.21: Espectro óptico em torno do ponto A_1 , capturado através do OSA. (Fonte: o autor.)

Na Figura 3.22, que representa a saída do MUX WDM, a presença de mais picos indica a formação de um interferômetro de Fabry-Perot entre o HPLS e o MUX WDM. Esse fenômeno se configura quando há a formação de uma cavidade óptica entre dois pontos, na qual a potência óptica que se propaga na fibra é continuamente refletida, formando, assim, um filtro interferométrico de Fabry-Perot. Nesse caso, o interferômetro foi formado entre os pontos A_1 e B_1 .

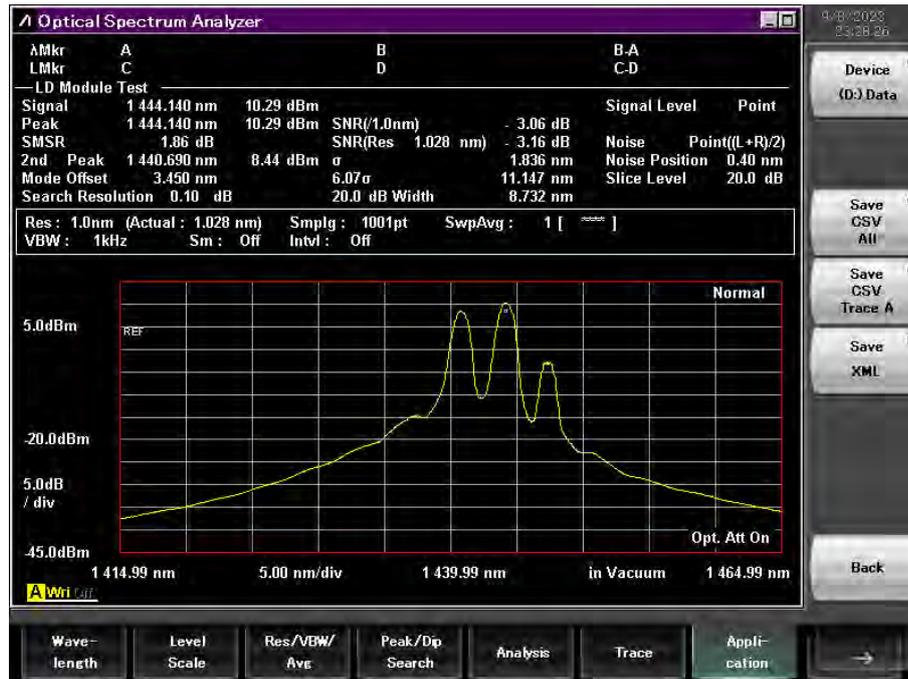


Figura 3.22: Espectro óptico em torno do ponto B_1 , capturado através do OSA. (Fonte: o autor.)

No ponto C_1 , o efeito é propagado pela fibra SMF e é observado também no OSA.

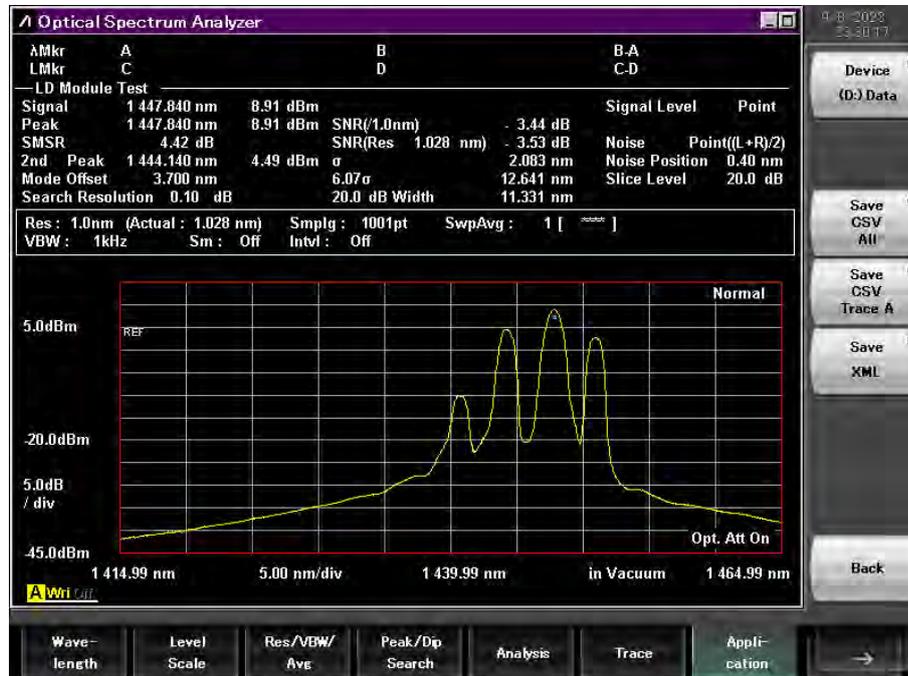


Figura 3.23: Espectro óptico em torno do ponto C_1 , capturado através do OSA. (Fonte: o autor.)

Após passar pelo acoplador óptico, o espectro atenuado do sinal observado no ponto D_1 é similar ao espectro do ponto C_1 .

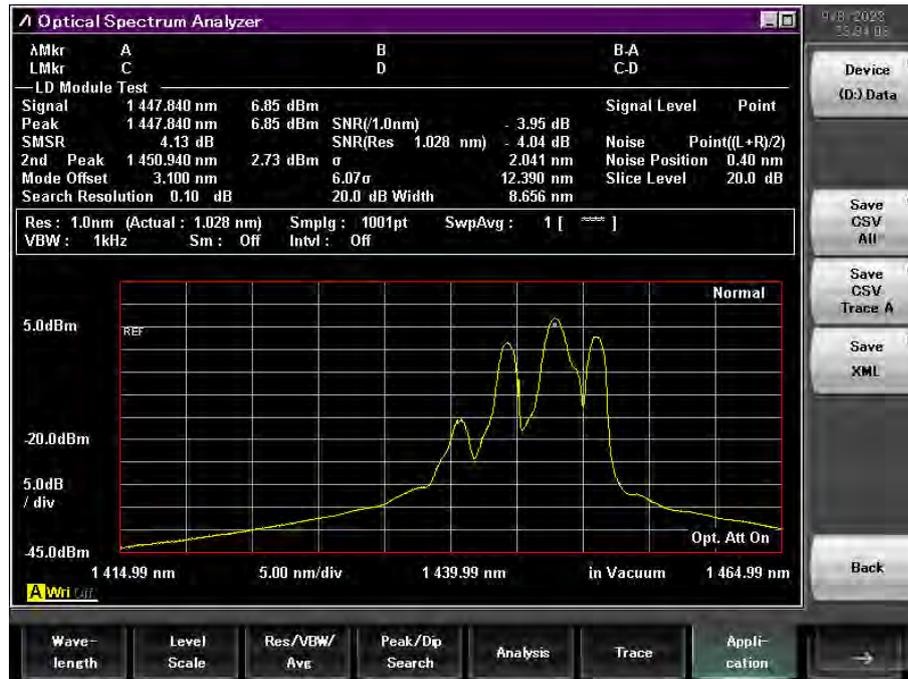


Figura 3.24: Espectro óptico em torno do ponto D_1 , capturado através do OSA. (Fonte: o autor.)

No ponto E_1 , que representa a saída de 9,5% do acoplador óptico, o sinal aparece atenuado em 9,41 dB, que é um valor bem próximo do esperado (10 dB). O efeito interferométrico é também observado, num comprimento de onda similar ao do ponto D_1 .

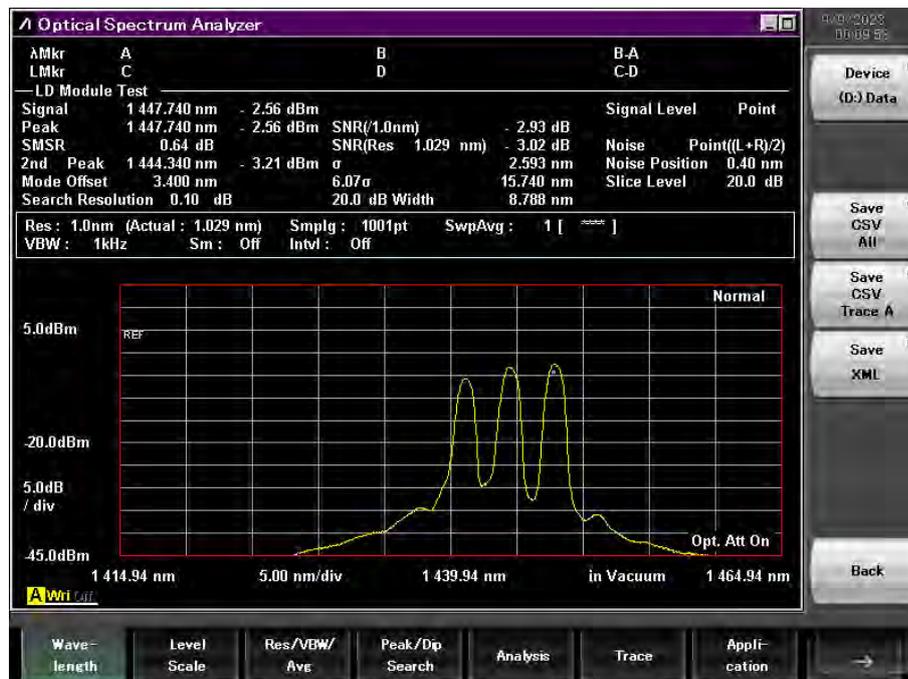


Figura 3.25: Espectro óptico em torno do ponto E_1 , capturado através do OSA. (Fonte: o autor.)

No ponto F_1 , o espectro do sinal do HPLS possui uma atenuação alta, cerca de 39,48 dB, que é um resultado esperado, já que o filtro sintonizável deve atenuar a potência em torno do comprimento de onda do laser de bombeio. Além disso, há um aumento considerável do ruído no espectro desse ponto.

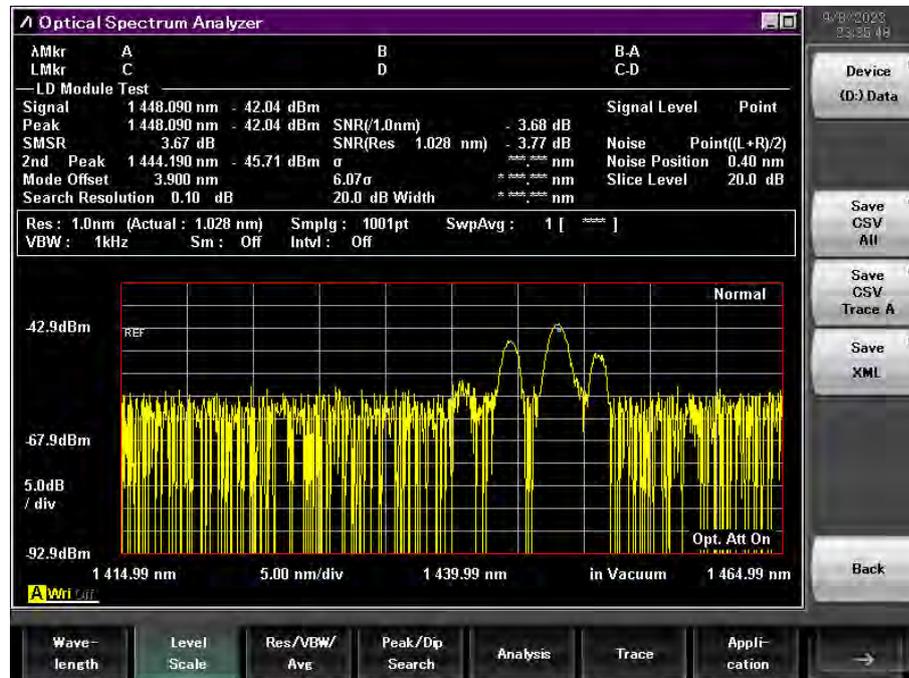


Figura 3.26: Espectro óptico em torno do ponto F_1 , capturado através do OSA. (Fonte: o autor.)

No registro das Figuras 3.27 e 3.28, ambos os lasers foram ligados simultaneamente para se observar um possível ganho Raman (ou efeito on-off Raman).

De acordo com as Figuras 3.27 e 3.28, não foi observada nenhuma interação entre os comprimentos de onda a ponto de ser observado um ganho Raman (ou ganho *on-off* Raman) na saída da fibra óptica SMF. Na Figura 3.27, o sinal do HPLS aparece atenuado, como esperado, enquanto o sinal do laser DFB possui uma potência maior e suficiente para a transmissão de dados.

Espera-se que, com a melhoria no balanço de potência do sistema, ao se diminuir as perdas ópticas geradas ao longo do link até os pontos C_1 e D_2 e aumentando-se da potência fornecida pelo HPLS, sejam observados comportamentos mais próximos de uma amplificação Raman.

Para os pontos A_2 a F_2 , cujos espectros estão representados nas Figuras 3.29 a 3.34,

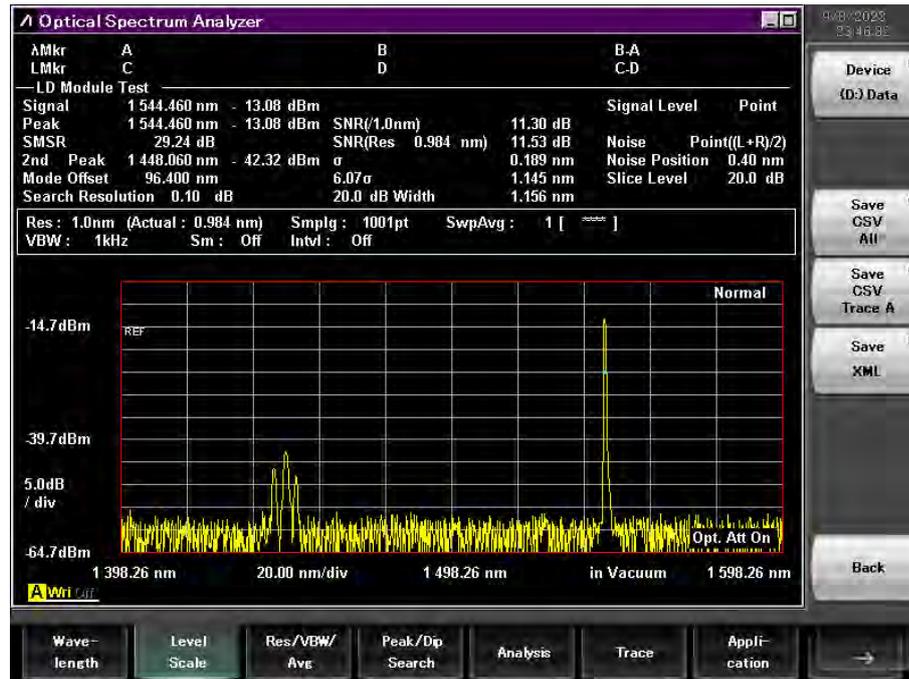


Figura 3.27: Espectro óptico em torno dos pontos F_1 e F_2 , capturado através do OSA. (Fonte: o autor.)

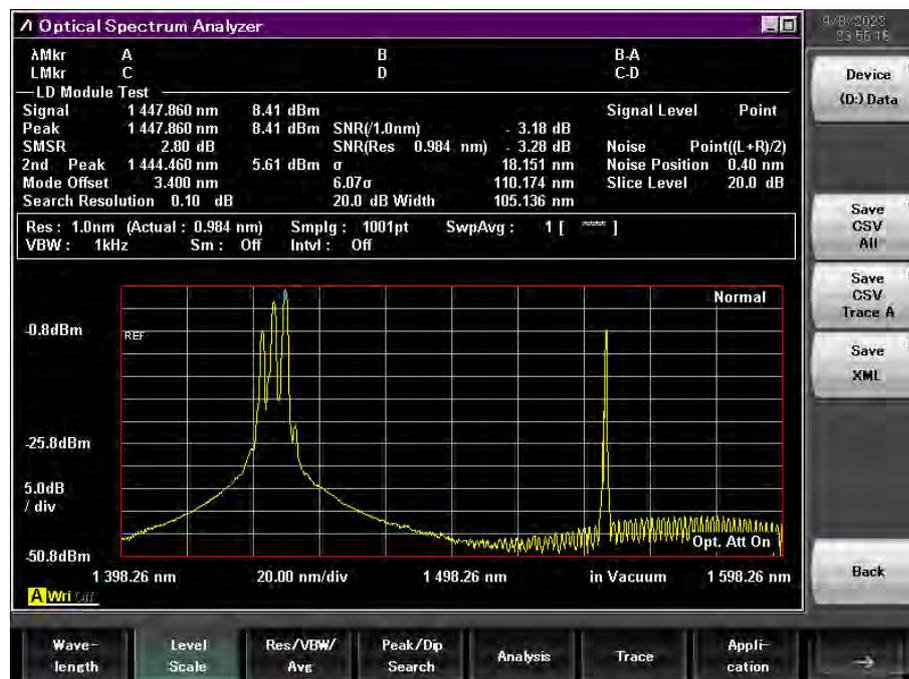


Figura 3.28: Espectro óptico em torno dos pontos C_1 e D_2 , capturado através do OSA. (Fonte: o autor.)

o espectro do laser DFB se mostrou comportado e sem a influência de efeitos ópticos, já que este laser possui uma potência nominal menor e uma largura de banda pequena.

A qualidade da transmissão do sinal de dados conjuntamente com o sinal do HPLS

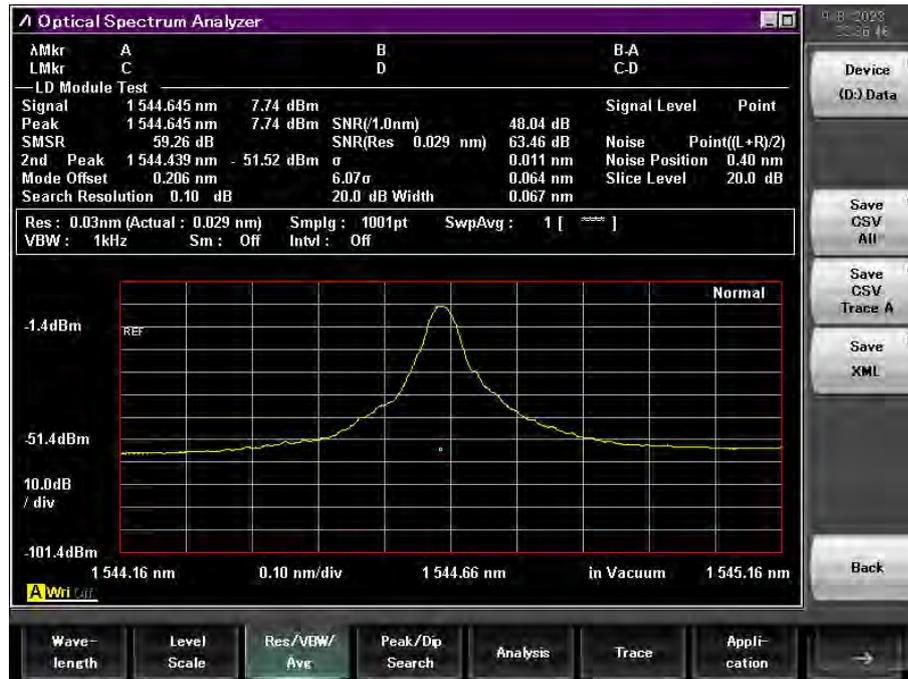


Figura 3.29: Espectro óptico em torno do ponto A_2 , capturado através do OSA. (Fonte: o autor.)

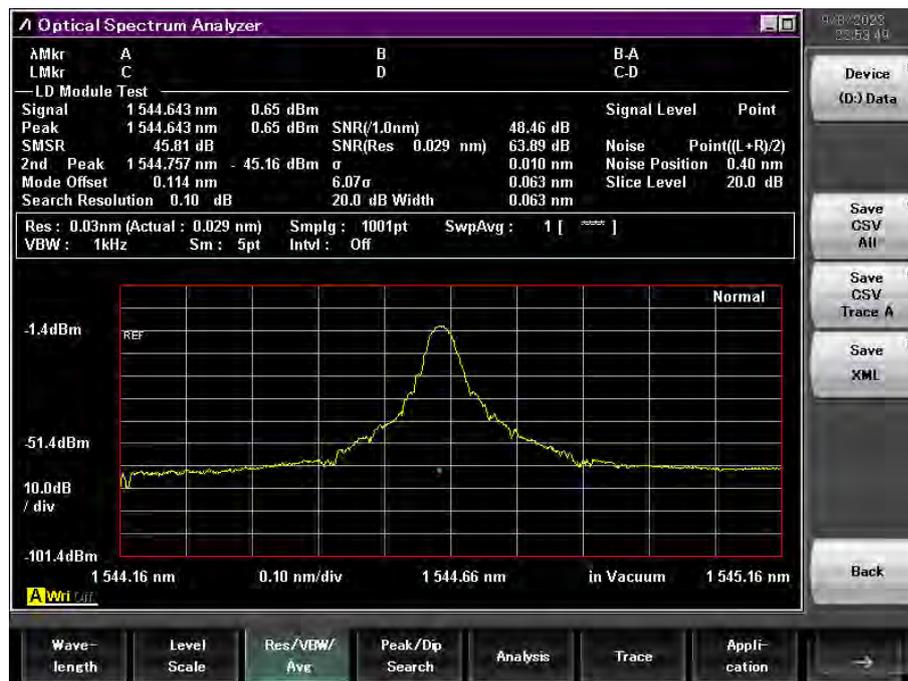


Figura 3.30: Espectro óptico em torno do ponto B_2 , capturado através do OSA. (Fonte: o autor.)

foi avaliada e, apesar do ruído presente ao longo dos espectros das Figuras 3.27 e 3.28, não houve qualquer alteração na constelação do sinal após a recepção dos componentes em fase e em quadratura do sinal. Essa qualidade é avaliada através de três casos:

No primeiro (Figura 3.35), a constelação do sinal QPSK com o laser DFB ligado (com

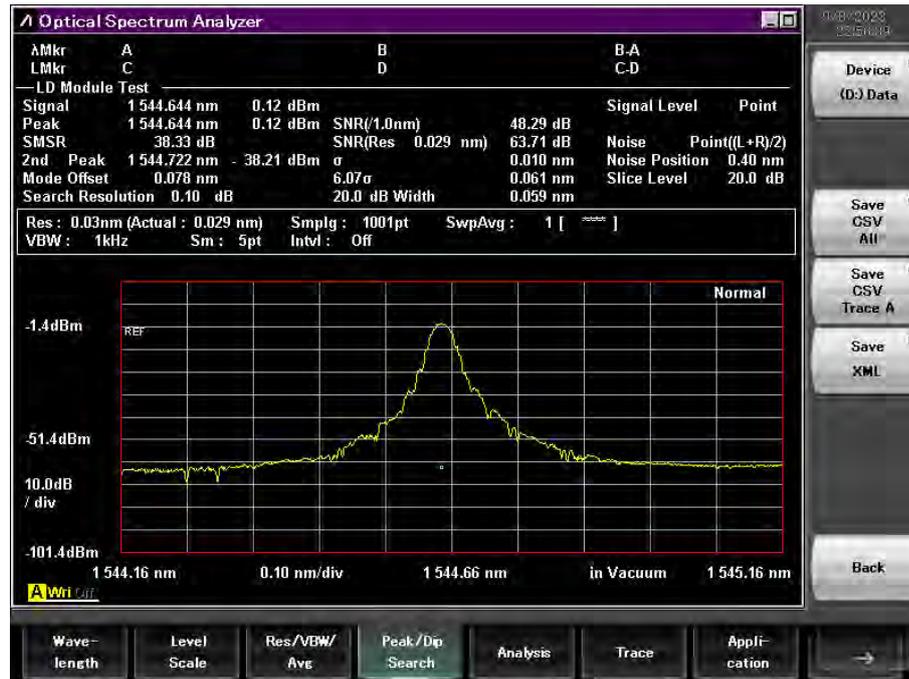


Figura 3.31: Espectro óptico em torno do ponto C_2 , capturado através do OSA. (Fonte: o autor.)

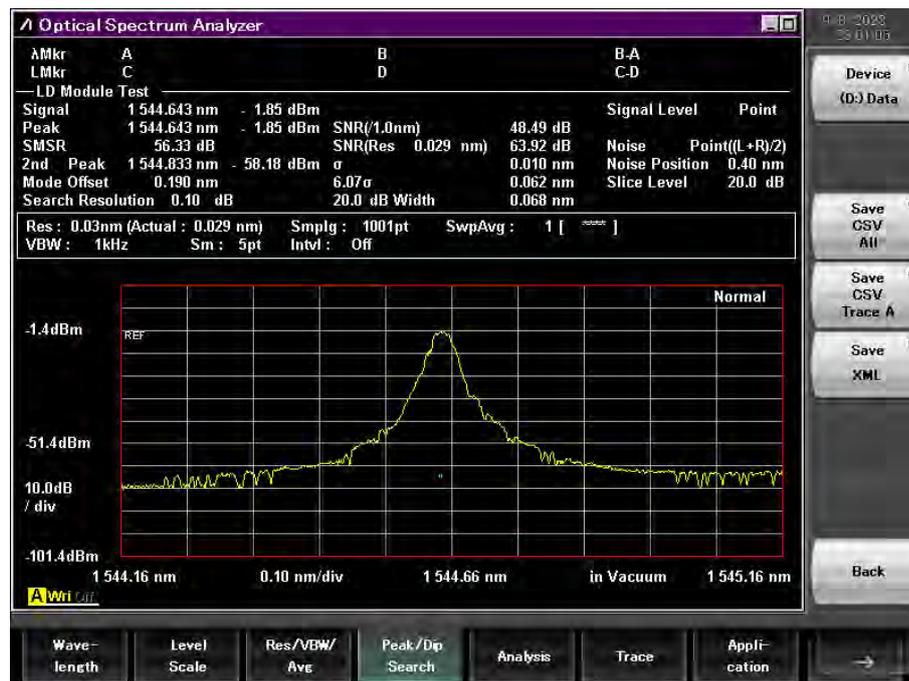


Figura 3.32: Espectro óptico em torno do ponto D_2 , capturado através do OSA. (Fonte: o autor.)

seu controlador a 110 mA) e o laser de bombeio desligado é registrada:

No segundo (Figura 3.36) e terceiro (Figura 3.37) casos, tem-se as constelações na configuração em que o laser DFB é mantido a 110 mA e o laser de bombeio é ligado, respectivamente, a 400 mA e 700 mA.

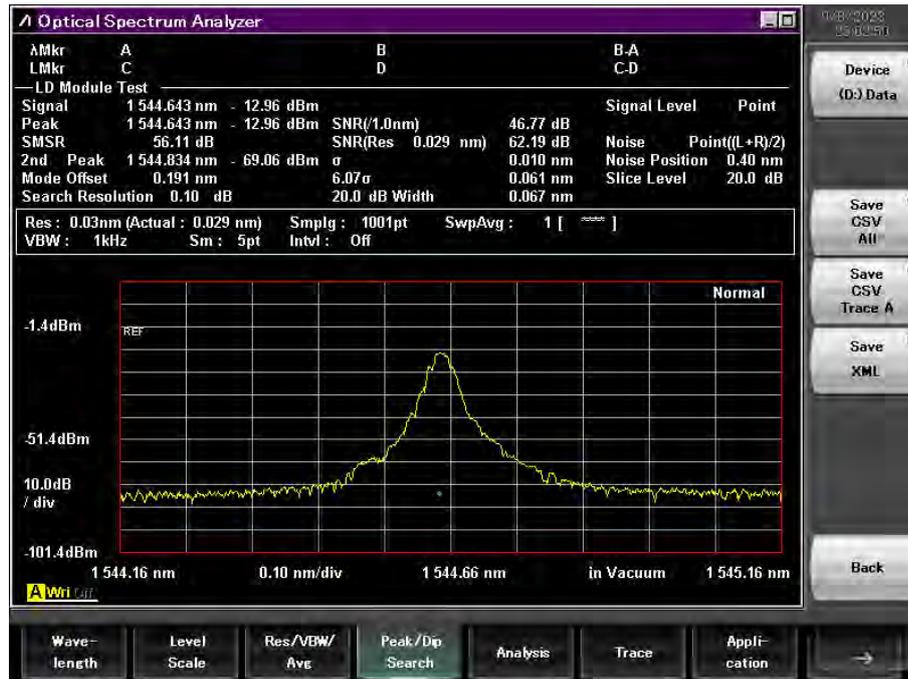


Figura 3.33: Espectro óptico em torno do ponto E_2 , capturado através do OSA. (Fonte: o autor.)

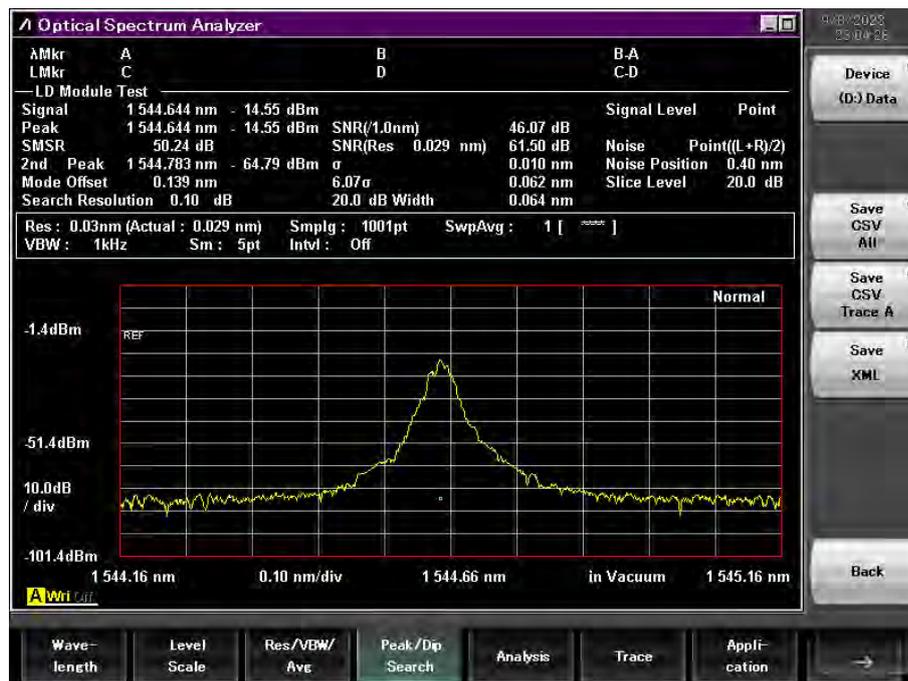


Figura 3.34: Espectro óptico em torno do ponto F_2 , capturado através do OSA. (Fonte: o autor.)

Percebe-se que as constelações nos dois últimos cenários não sofreram alterações significativas devido à presença do sinal de alta potência. Assim, valida-se a alimentação elétrica por fibra óptica juntamente com a transmissão de dados no sistema.

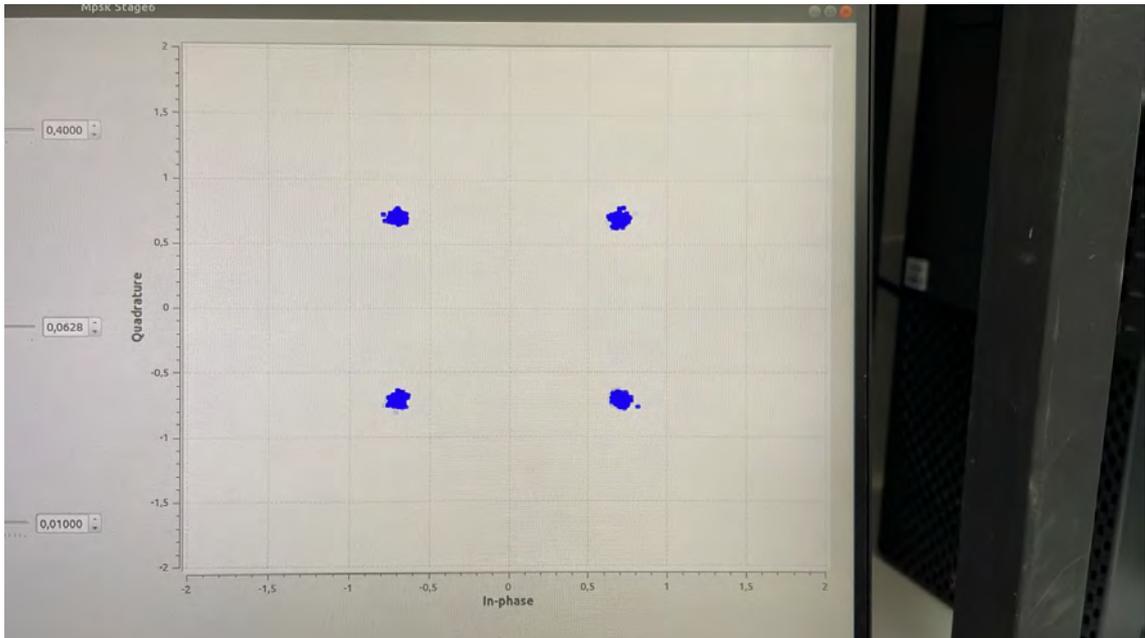


Figura 3.35: Constelação do sinal QPSK recebida no GNU Radio após transmissão do laser DFB, com o laser HPLS desligado. (Fonte: o autor.)

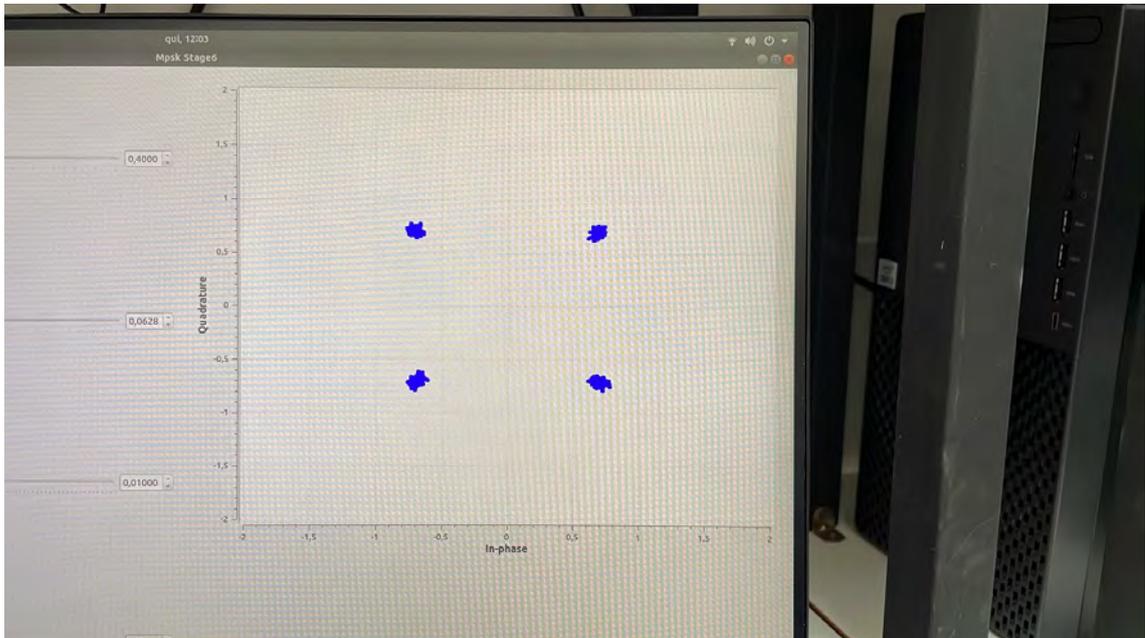


Figura 3.36: Constelação do sinal QPSK recebida no GNU Radio após transmissão do laser DFB, com o laser HPLS calibrado a 400 mA em seu controlador. (Fonte: o autor.)

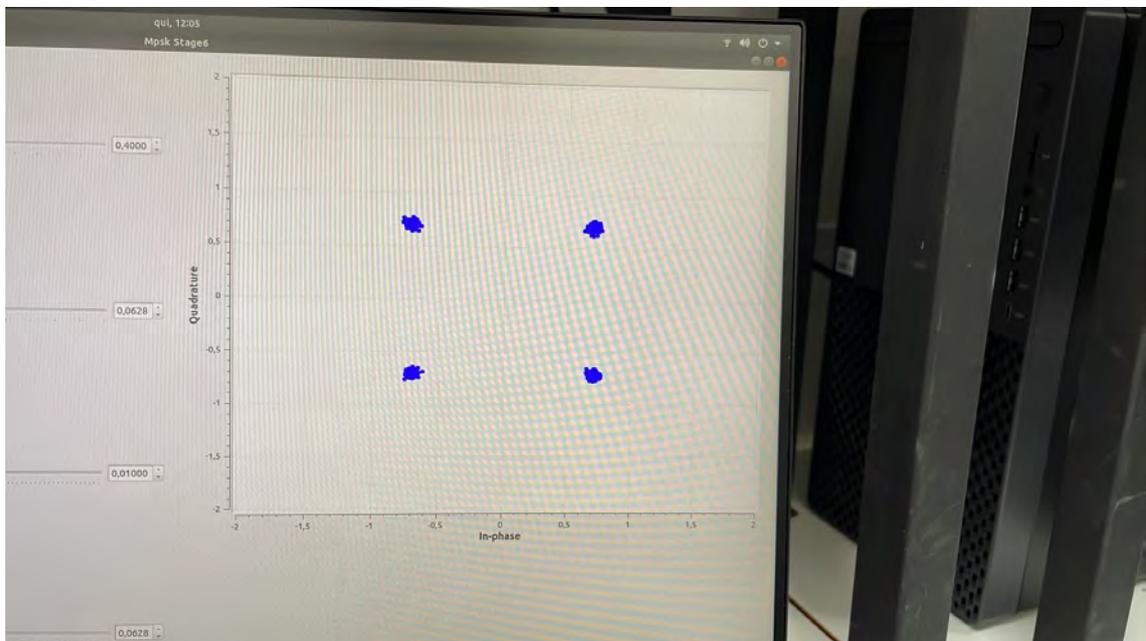


Figura 3.37: Constelação do sinal QPSK recebida no GNU Radio após transmissão do laser DFB, com o laser HPLS calibrado a 700 mA em seu controlador. (Fonte: o autor.)

3.4.3 Conversão Óptico-Elétrica e Potência Disponível na Unidade Remota

A conversão óptico-elétrica no ponto D_1 da Figura 3.17 é o objetivo principal do sistema de alimentação por fibra óptica. Como foi visto anteriormente no capítulo 2, ao receber a potência óptica da saída de 90,5% do acoplador, o sistema deve ser capaz de convertê-la em potência elétrica através de um conversor fotovoltaico, para posteriormente ser tratada adequadamente através de circuitos reguladores de tensão, alimentando, assim, dispositivos ou sensores.



Figura 3.38: Conversor fotovoltaico comercial. Fonte: (KYOTO SEMICONDUCTOR Co., Ltd., 2023).

Como mostrado na seção anterior, considerando o experimento montado, uma potência de cerca de 13,46 dBm (ou 22,18 mW) está disponível para conversão. O conversor fotovoltaico comercial presente na Figura 3.38, fabricado pela empresa *Kyosemi*, possui características como: conector do tipo *pigtail* de fibra monomodo, isolamento elétrico total, capacidade de conversão na faixa de 1300-1600 nm e saída elétrica de até 3V-20mA (ver Figura 3.39). Além disso, suporta até 200 mW de potência óptica de entrada, que

seria suficiente para os objetivos iniciais propostos pelo estudo.

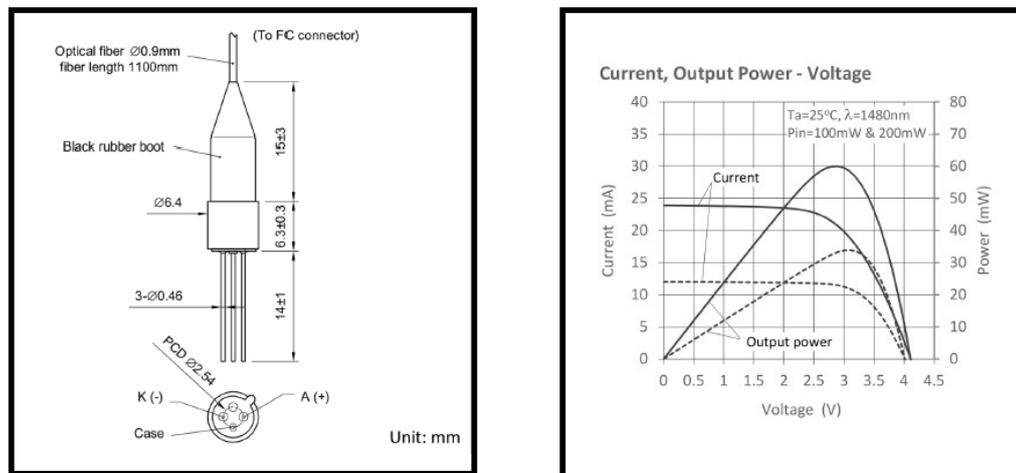


Figura 3.39: Características físicas e parâmetros de corrente, tensão e potência de saída do conversor fotovoltaico da *Kyosemi*.

Assim, com o objetivo futuro de se introduzir um módulo PVC como o da Figura 3.38 (ou uma associação de conversores, a depender da magnitude de potência óptica disponível para conversão), estima-se que cerca de 6,7 mW de potência elétrica esteja disponível na Unidade Remota para alimentação de dispositivos, considerando uma eficiência típica de conversão do dispositivo como 30% (informação da folha de dados do fabricante).

Obviamente, trata-se de um valor inicial e com potencial de aprimoramento mediante algumas alterações e otimizações no sistema montado, como foi explicado na seção anterior e como será mostrado também na conclusão deste estudo.

A princípio, a fonte óptica principal, que é o laser de bombeio, possui capacidade nominal de fornecer até 435 mW de potência óptica para o sistema. Escolhendo-se uma fonte óptica com potência de saída maior e ao mesmo tempo substituindo os conectores por emendas de fibra (fusão), pode-se obter um balanço de potência melhor no ponto D_1 e, assim, fornecer mais potência à entrada do PVC. Num cenário ideal, em que a potência elétrica de saída do PVC se aproxima dos 60 mW suportados pelo conversor citado, pode-se evitar a saturação (e possíveis danos) da célula fazendo-se uma associação em paralelo de conversores fotovoltaicos, a fim de maximizar a capacidade de alimentação elétrica de saída (ver Figura 3.40).

Além disso, é importante ajustar a impedância de saída do PVC com os sensores ao

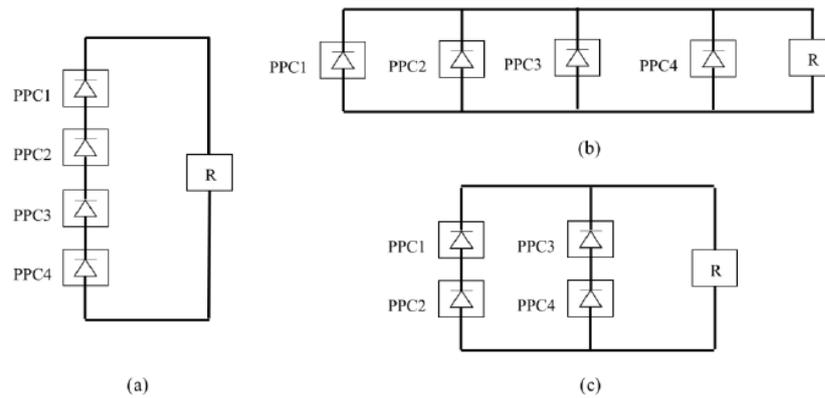


Figura 3.40: Exemplos de associação de conversores fotovoltaicos: (a) Em série; (b) Em paralelo; (c) Combinação série-paralelo. Fonte: (SOUZA, 2023).

se introduzir um circuito casador de impedância entre a saída do conversor e um regulador de tensão utilizado para estabilizar a tensão (ou corrente) na entrada dos sensores/dispositivos. Circuitos de monitoramento de corrente e tensão podem ser empregados para automaticamente ajustar a temperatura e impedância do sistema a fim de garantir sempre a máxima potência de saída possível para a Unidade Remota.

Capítulo 4

Considerações Finais

A SEGUIR, são apresentadas as conclusões, dificuldades de realização e possibilidades de continuidade e melhoria do sistema apresentado no trabalho.

4.1 Conclusão

O sistema de alimentação elétrica por fibra óptica proposto obteve um comportamento satisfatório. As fontes ópticas utilizadas se comportaram dentro do esperado, assim como o restante dos componentes, individualmente ou funcionando conjuntamente. O sistema se mostrou estável e apenas os efeitos de atenuação óptica do sinal ao longo do link foram críticos para a degradação do desempenho do sistema, como foi analisado no capítulo anterior. Apesar da potência de cerca de 22,18 mW obtida na saída de 90,5% do acoplador óptico ter sido aquém do esperado, há melhorias claras e possíveis que podem ser implementadas no sistema para a obtenção de resultados mais sólidos e aprimorados.

Quanto à transmissão de dados, os resultados observados no GNU Radio foram esperados e não houve alteração significativa da constelação do sinal QPSK recebido no receptor do SDR. A presença do laser Raman de alta potência não interferiu na recepção do sinal enviado no mesmo link.

Assim, pode-se concluir que, de forma geral, os resultados foram satisfatórios e possuem grande potencial de melhoria com a continuidade do trabalho.

4.2 Dificuldades Encontradas

Dentre as dificuldades experimentadas durante a implementação do sistema, destaca-se a alta perda de potência entre o ponto A_1 e o ponto D_1 da Figura 3.17, que impactou diretamente na disponibilidade de potência óptica a ser convertida por um possível conversor fotovoltaica a ser inserido no sistema. Essas perdas podem ser explicadas pela quantidade considerável de conectores ópticos presentes entre esses dois pontos e também por uma possível imprecisão ou problema de acoplamento na saída de maior potência (90,5%) do acoplador óptico.

Relacionado ao problema acima, infelizmente não foi possível a aquisição de um conversor fotovoltaico para o sistema (como o da Figura 3.38), devido a certas condições de realização do projeto.

Além disso, uma análise mais abrangente sobre os efeitos da configuração atual do sistema (conectores e tipos de fibra na saída das fontes ópticas, MUX, acoplador) sobre os diferentes modos de polarização que a luz experimentou ao longo do link também não foi possível. Isso potencialmente poderia levar a uma melhoria na integridade da potência que chegaria à entrada do PVC.

4.3 Trabalhos Futuros

Algumas melhorias propostas para a continuidade do estudo foram elencadas ao longo do capítulo anterior e são sumarizadas abaixo:

- Implementação de mais pontos de fusão de fibra no sistema, em substituição aos conectores ópticos, que introduzem uma atenuação cumulativa maior;
- Substituição do laser de bombeio por outro com maior potência nominal de saída nas redondezas do comprimento de onda já estabelecido no sistema (1435 nm), tomando-se o devido cuidado com o surgimento de efeitos não-lineares na fibra e possíveis fontes de ruído adicionais;
- Introdução de um ou mais conversores fotovoltaicos no sistema, a depender da quan-

tidade de potência óptica que se conseguirá disponibilizar na entrada do conversor. Para evitar uma possível saturação, recomenda-se uma associação de conversores para a máxima conversão de potência elétrica. Ver (CARDONA, 2022) e (SOUZA, 2023);

- Juntamente com o ponto acima, é desejável a introdução de dispositivos IoT, sensores ou outros dispositivos úteis para as aplicações pretendidas com o sistema;
- Realizar a transmissão utilizando um link mais extenso de fibra SMF e, possivelmente, em um cenário real de aplicação.

Referências

AGRAWAL, G. P. *Fiber-optic Communication Systems*. 4. ed. [S.l.]: John Wiley Sons, Inc., 2010. ISBN 978-85-352-6425-8.

AMS Technologies. *MANUALLY ADJUSTABLE POLARIZATION INSENSITIVE TUNABLE FILTERS Datasheet*. 2023. <<https://www.amstechnologies-webshop.com/media/pdf/b1/1f/fe/TF-11-Manually-Adjustable-Tunable-Filters-OZ-Optics-Datasheet.pdf>>. [Online; acesso em 28 de julho de 2023].

CARDONA, J. D. L. *Sistemas de alimentación remota con fibras ópticas en sistemas de comunicaciones y sensado*. Tese (Tese de D.Sc.) — Universidad Carlos III de Madrid, Leganés, Madrid, España, 2022.

Cisco Systems, Inc. *Practical Aspects of Raman Amplifier*. 2023. <<https://www.cisco.com/c/en/us/support/docs/optical-networking/ons-15454-m6-multiservice-transport-platform-mstp/212834-practical-aspects-of-raman-amplifier.pdf>>. [Online; acesso em 10 de setembro de 2023].

COELHO, L. D. *Modeling, Simulation and Optimization of Optical Communication Systems using Advanced Modulation Formats*. 192 p. Tese (Doutorado) — Technische Universität München, 2010.

Coherent Corp. *YTTERBIUM FIBER LASERS ENABLE CUTTING-EDGE NEUROSCIENCE*. 2023. <<https://www.coherent.com/web-resources/article/neuroscience-ytterbium-fiber-lasers>>. [Online; acesso em 14 de abril de 2023].

DIOUF, C.; QUINTARD, V.; GHISA, L. Design, characterization, and test of a versatile single-mode power-over-fiber and communication system for seafloor observatories. *IEEE JOURNAL OF OCEANIC ENGINEERING*, v. 45, n. 2, p. 656–664, 2020.

Ettus Research. *USRPTM X300 and X310 X Series Datasheet*. 2023. <https://www.ettus.com/wp-content/uploads/2019/01/X300_X310_Spec_Sheet.pdf>. [Online; acesso em 28 de julho de 2023].

- Fiber Optics For Sale Co. *OPTICAL FIBER LOSS AND ATTENUATION*. 2023. <https://www.fiberoptics4sale.com/blogs/archive-posts/95048006-optical-fiber-loss-and-attenuation>. [Online; acesso em 14 de abril de 2023].
- GNU Radio Project. *About GNU Radio*. 2022. https://wiki.gnuradio.org/index.php?title=What_Is_GNU_Radio. [Online; acesso em 14 de abril de 2023].
- GNU Radio Project. *About GNU Radio*. 2023. <https://www.gnuradio.org/about/>. [Online; acesso em 14 de abril de 2023].
- KEISER, G. *Optical Fiber Communications*. 4. ed. [S.l.]: McGraw-Hill, 2010. ISBN 978-0073380711.
- KYOTO SEMICONDUCTOR Co., Ltd. *Photovoltaic Power Converter KPC8-T*. 2023. <https://www.kyosemi.co.jp/en/products/kpc8-t/>. [Online; acesso em 10 de setembro de 2023].
- LÓPEZ-CARDONA, J. D. et al. Remote optical powering using fiber optics in hazardous environments. *J. Lightwave Technol.*, Optica Publishing Group, v. 36, n. 3, p. 748–754, Feb 2018. Disponível em: <https://opg.optica.org/jlt/abstract.cfm?URI=jlt-36-3-748>.
- MATSUURA, M. Power-over-fiber using double-clad fibers. *Journal of Lightwave Technology*, v. 40, n. 10, p. 3187–3196, 2022.
- Nortel Networks. *PP-10G 10Gb/s PIN Preamp Receiver Datasheet*. 2023. <https://www.oquest.com/getDatasheet/id/1422-1422.pdf>. [Online; acesso em 28 de julho de 2023].
- REZENDE, S. M. *Materiais e Dispositivos Eletrônicos*. 4. ed. [S.l.]: Editora Livraria da Física, 2015. ISBN 9788578613594.
- ROSOLEM, J. B. “power-over-fiber applications for telecommunications and for electric utilities”. *Optical Fiber and Wireless Communications*, doi: 10.5772/68088, 2017.
- SOUZA, R. H. D. *Interactions Between Microwave Photonics and Power Over Fiber Technologies in the Framework of Self-Powered Remote RF Sensors*. 175 p. Tese (Doutorado) — Instituto Tecnológica de Aeronáutica, 2023.
- WYGLINSKI, A. et al. *Software-Defined Radio for Engineers*. Artech House, 2018. (Artech House Mobile Communications Series). ISBN 9781630814595. Disponível em: <https://books.google.com.br/books?id=cKR5DwAAQBAJ>.