

Universidade Federal de Itajubá – UNIFEI

Programa de Pós-Graduação
em Engenharia Elétrica

**ENSAIOS DE PERDA POR INSERÇÃO E POR RETORNO EM
CONECTORIZAÇÕES MECÂNICAS EM FIBRA ÓPTICA**

Allann Breno de Sales Pereira

Itajubá, agosto de 2023

Universidade Federal de Itajubá – UNIFEI

Programa de Pós-Graduação
em Engenharia Elétrica

Allann Breno de Sales Pereira

**ENSAIOS DE PERDA POR INSERÇÃO E POR RETORNO EM
CONECTORIZAÇÕES MECÂNICAS EM FIBRA ÓPTICA**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica como parte dos requisitos para obtenção do Título de Mestre em Ciências em Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Automação e Sistemas Elétricos Industriais.

Orientador: Prof. Dr. Robson Luiz Moreno

Coorientador: Prof. Dr. Roberto Shigueru Nobuyasu Junior

Itajubá, agosto de 2023

Este trabalho é dedicado à minha mãe.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a minha mãe, Ana Teresa de Sales Pereira, por todo o apoio e incentivo durante a realização deste trabalho.

Agradeço ao meu Orientador, Professor Dr. Robson Luíz Moreno, pelo apoio disponibilizando tempo e experiência para a elaboração deste trabalho.

Agradeço ao Professor Dr. José Carlos Grilo Rodrigues pela oportunidade e confiança para o desenvolvimento deste trabalho.

Agradeço ao meu Coorientador, Professor Dr. Roberto Shigueru Nobuyasu Junior, pela contribuição no desenvolvimento deste trabalho.

Agradeço aos meus colegas de trabalho do LEPCH-LTET, Luiz Otávio, Luciano e Lúcio.

Agradeço à PRPPG, em especial as secretárias do Programa de Pós em Engenharia Elétrica e ao Coordenador do programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica.

Agradeço aos Professores Martinez, Bortoni e Isaias, que mesmo não tendo apoiado até o fim, contribuíram para este trabalho.

RESUMO

Este trabalho apresenta um entendimento sobre a execução de ensaios de conectorizações mecânicas de fibra ótica utilizadas na transmissão de dados. Nesse estudo, são feitas medições de perda óptica em conectores mecânicos como Perda de Inserção (PI) e Perda de Retorno (PR) em fibras monomodos. A metodologia de ensaio baseou-se nos requisitos de certificação para comercialização de produtos de telecomunicações pela Agência Nacional de Telecomunicações (ANATEL) e normas internacionais da *International Electrotechnical Commission*(IEC).

Além da argumentação teórica fundamental, realizamos uma avaliação de conectores montados em campo de dez diferentes fabricantes comercializados no Brasil. Os testes foram realizados no comprimento de onda da fonte de luz de 1550 nm com base em dois grupos de testes: testes climáticos e mecânicos. Sendo que os valores das perdas ópticas foram medidos tanto inicialmente quanto durante os testes, dependendo, portanto, dos requisitos das normas. Ademais, foi utilizado a estrutura física e equipamentos do Laboratório para Testes de Equipamentos de Telecomunicações (LTET) e Laboratório de Vibrações e Acústica (LVA) da Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI).

Palavras-chave: Fibras ópticas; Conectorização Mecânica; Perdas Ópticas.

ABSTRACT

This work presents an understanding about the execution of tests on fiber optic connectorizations used in data transmission. In this study, optical loss measurements is made in mechanical connectors such as Insertion Loss (IL) and Return Loss (RL) based. The test methodology was based on the certification requirements for the commercialization of telecommunications products by the National Telecommunications Agency (ANATEL) and international standards of the International Electrotechnical Commission (IEC).

In addition to the fundamental theoretical argument, we performed an evaluation of field-mounted connectors from ten different manufacturers sold in Brazil. The tests were carried out at the light source wavelength of 1550 nm based on two groups of tests: climatic and mechanical tests. In which the optical loss values are measured both initially and during the tests, thus depending on the requirements of the standards. Furthermore, It was carried out through the facilities and equipments from the Laboratory for Testing Telecommunications Equipment (LTET) at the Federal University of Itajubá (UNIFEI).

Keywords: optical fibers, mechanical connectorization, optical losses.

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	4
RESUMO	5
Sumário	7
Lista de Abreviaturas e Símbolos	9
Lista de Figuras	10
Lista de Tabelas	12
1 INTRODUÇÃO	13
1.1 Considerações Iniciais	13
1.2 Objetivo e Contribuições.....	14
1.3 Metodologia de Pesquisa	15
1.4 Organização do Trabalho	15
2 REVISÃO TEÓRICA	17
2.1 Propagação em fibras ópticas.....	17
2.2 Teoria da Transmissão por Fibra Óptica.....	18
2.2.1 Reflexão e refração da onda eletromagnética.....	18
2.2.2 Descrição da fibra óptica	19
2.2.3 Modos guiados	21
2.2.4 Vantagens de transmissão via fibra óptica	23
2.2.5 Causas da degradação do feixe óptico transmitido	23
2.3 Fontes ópticas.....	27
2.3.1 Características gerais	27
2.3.2 Diodos lasers para sistemas de alta capacidade.....	28
2.4 Detecção do feixe óptico modulado	29
2.4.1 Funcionamento do fotodetector.....	29
2.4.2 Parâmetros relevantes para os fotodetectores.....	31
2.5 Parâmetros ópticos.....	33
2.5.1 Perda de Inserção - PI	33
2.5.2 Perda de retorno - PR.....	33
2.5.3 Conectorização mecânica.....	35
3 Metodologia	44
3.1 Regulamentação dos Ensaios realizados	45

3.1.1	Requisitos Anatel	45
3.1.2	Normas IEC	68
3.2	Estrutura física e dispositivos para os testes	68
3.3	Corpos-de-prova e amostragem para o estudo.....	73
3.3.1	Estudo 1	73
3.3.2	Estudo 2	74
4	Resultados.....	76
4.1	Análise do estudo 1	76
4.2	Análise do estudo 2	81
5	Conclusões e trabalhos futuros	84
6	Referências.....	86

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

ANATEL	Agência Nacional de Telecomunicações
APC	<i>Angled Physical Contact</i>
FTTH	<i>Fiber-to-the-home</i>
GBIC	<i>Gigabit Interface Converter</i>
ISEE	Instituto de Sistemas Elétricos e Energia
IEM	Instituto de Engenharia Mecânica
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i>
LTET	Laboratório para Testes de Equipamentos de Telecomunicações
LVA	Laboratório de Vibração e Acústica
PC	<i>Physical Contact</i>
PERT	Plano Estrutural de Redes de Telecomunicações
PGMU V	Plano Geral de Metas para a Universalização
PI	Perda de Inserção
PR	Perda de Retorno
RBC	Rede Brasileira de Calibração
SFP	<i>Small Form-factor Pluggable</i>
UNIFEI	Universidade Federal de Itajubá
UPC	<i>Ultra Physical Contact</i>
UR	Umidade Relativa

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Vista em corte transversal de uma fibra óptica típica.....	18
Figura 2.2 – Interface de uma onda eletromagnética na interface de dois meios.	19
Figura 2.3 - Representação longitudinal da fibra óptica com indicação dos parâmetros que define sua abertura numérica.....	20
Figura 2.4 - Ângulo de captação na face da fibra, determinado pela sua abertura numérica.....	20
Figura 2.5 - Esquema ilustrativo da dispersão intermodal, admitindo a formação de três modos de propagação na fibra óptica.	26
Figura 2.6 - Comportamento típico de uma fonte de luz empregada em sistemas de comunicações ópticas.	27
Figura 2.7 - Resposta espectral típica de um diodo laser monomodo para elevadas taxas de modulação.	29
Figura 2.8 - Esquema da transferência de elétrons sob a ação do feixe óptico incidente com energia superior à da banda proibida. Fonte: Autor.	30
Figura 2.9 - Comportamento típico da eficiência quântica de um dispositivo semiconductor em função do comprimento de onda.....	31
Figura 2.10 - Representação da fotocorrente gerada em função da potência óptica incidente no fotodetector. Fonte: Autor.	32
Figura 2.11 - Sobreposição de núcleos dos cabos de fibra.....	37
Figura 2.12 - Perda por incompatibilidade de abertura numérica.....	38
Figura 2.13 - Perda por separação das interfaces.	38
Figura 2.14 - Conexão mecânica de dois conectores de fibra óptica com a utilização de um adaptador.	39
Figura 2.15 - Trecho de relatório de microscópio que identifica a qualidade do polimento do conector de fibra óptica para utilização.....	40
Figura 2.16 - Exemplos de diversas condições da face terminal do conector.	41
Figura 2.17 - Canetas utilizadas para a limpeza da face terminal do conector.	42
Figura 3.1 - Os três tipos de conector ensaiados.	45
Figura 3.2 - Montagem do corpo-de-prova.	47
Figura 3.3 - Ciclo de Temperatura.....	49
Figura 3.4 - Esquema do ensaio de impacto.	53
Figura 3.5 - Ciclo de Temperatura.....	58

Figura 3.6 - Ciclo de Temperatura.....	64
Figura 3.7 - Esquema do dispositivo de imersão.....	66
Figura 3.8 - Camara Climática Heraeus HC 4033.	69
Figura 3.9 - Dispositivos para a realização dos ensaios mecânicos.	69
Figura 3.10 - Dispositivo para a realização do ensaio imersão em água.	70
Figura 3.11 - Dispositivo para a realização do ensaio de vibração, Labworks Inc. SC-121.	70
Figura 3.12 - Equipamento de medição de PI e PR, NKLT Modelo SGX 501.	71
Figura 3.13 - Equipamento de Medição de PI e PR, JGR Modelo RL1.	71
Figura 3.14 - Microscópio eletrônico, Santec modelo CS200K-CM.	71
Figura 3.15 - Equipamentos de suporte aos ensaios a) Régua Brasfort, b) pesos calibrados, c) balança digital Filizola 060*852 e d) cronômetro Jaquet analógico.....	72
Figura 4.1 - Medições de PI e PR Iniciais	76
Figura 4.2 - Resultado dos ensaios do Grupo II.	78
Figura 4.3 - Resultado dos ensaios do Grupo III.	79
Figura 4.4 - Comparativo da PR Mínima entre os Grupos I, II e III.....	80
Figura 4.5 - Variação de PI Máxima após ensaios do Grupo II e Grupo III.	80
Figura 4.6 - Resultado da Variação Máxima de PI quando submetidos a diferentes ciclos térmicos.....	82
Figura 4.7 - Resultado da PR Mínima quando submetidos a diferentes ciclos térmicos.....	82

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Características dos principais lasers típicos aplicados em comunicações ópticas.....	29
Tabela 2 - Valores, em reais, de sete conectores montados em campo comercializados no Brasil.....	43
Tabela 3 – Relação de testes realizados	46
Tabela 4 - Classificação da conexão óptica quanto à perda por inserção.	47
Tabela 5 - Classificação da conexão óptica quanto à perda por retorno.....	47
Tabela 6 - Variação máxima da perda por inserção durante e a perda por retorno após o ensaio.	47
Tabela 7 - Variação máxima da perda por inserção durante e a perda por retorno após o ensaio.	50
Tabela 8 - Classificação da conexão óptica quanto à perda por inserção.	62
Tabela 9 - Relação das normas IEC utilizadas nos procedimentos de ensaio	68
Tabela 10 - Ensaio dividido em grupos.....	73
Tabela 11 - Resultado da variação máxima de PI e a PR mínima em dB após ensaios do Grupo II	77
Tabela 12 - Resultado da variação máxima de PI e a PR mínima em dB após ensaios do Grupo III	78
Tabela 13 - Resultado da variação de PI média em [dB] após aplicar três diferentes ciclos térmicos.....	81
Tabela 14 - Resultado da PR mínima média em [dB] após aplicar três diferentes ciclos térmicos.....	82

1 INTRODUÇÃO

São duas motivações principais para a realização deste trabalho. A primeira motivação foi analisar as normatizações internacionais existentes e adotadas pela ANATEL quanto aos requisitos técnicos para a certificação de produtos ópticos comercializados no Brasil. Alguns planos dessa agência regulamentadora, como por exemplo o Plano Estrutural de Redes de Telecomunicações (PERT) e o Plano Geral de Metas para a Universalização (PGMV U), promove a instalação de redes de alta capacidade de transmissão de dados, para acesso à internet por fibra óptica, em 2151 localidades brasileiras, além de apresentar tendências e projetar expectativas para em redes 5G (ANATEL, 2021). Logo, a compreensão dos mecanismos técnicos envolvidos serão relevantes nos próximos anos no país para os diversos integrantes, sejam eles fabricantes, comerciantes e usuários finais. Conjuntamente a motivação anterior, tem-se a desmistificação de paradigmas enfrentados por profissionais em telecomunicações através da “reunião” dos conceitos teóricos mais relevantes no tratamento técnico-operacional da temática abordada como sendo a segunda motivação deste trabalho.

1.1 Considerações Iniciais

O constante aumento na demanda de informações enviadas a longas distâncias estimulou a evolução tecnológica nos mais diversos equipamentos de transmissão de dados e, também, na otimização dos algoritmos nos processadores gerenciadores dessas informações. Nesse desenvolvimento, incluíram-se elementos passivos e ativos com aplicações bem definidas nas redes modernas de comunicações e nas redes de computadores.

A fibra óptica é um exemplo de elemento passivo fortemente inserido nessa evolução tecnológica e adequada ao maior tráfego de dados. Ela também é chamada de canal de fibra, em que para (Sorokina & Yankov, 2020), um canal é um meio pelo qual o sinal é transmitido. O sinal estudado nessa dissertação é a luz, e que apesar de poder se propagar pelo canal atmosférico, o foco será a transmissão pela fibra óptica. Assim como a transmissão de dados por cabos metálicos, a transmissão por fibra óptica também, em certos momentos, necessita-se de pontos de conexão. Esses pontos podem ser entendidos como transições de elementos ativos de um sistema de dados ou entre elementos passivos. Segundo (Frenzel, 2016), o termo passivo implica

em equipamentos que não fazem a conversão de sinais elétrico-óptico ou óptico-elétrico, por exemplo, amplificadores, repetidores ou qualquer outro equipamento baseado no gasto de energia elétrica. A diversidade de componentes que integram essa rede de transmissão de dados é muito grande, na qual a distância dos enlaces sem regeneração do sinal pode ser constituída de alguns centímetros, entre elementos de um datacenter, ou a, aproximadamente, 70 quilômetros, em cabos de fibra óptica submarinos (Carter, et al., 2009).

Nessa rede complexa é essencial manter-se a eficiência energética na transmissão do sinal modulado nas conexões. Essas conexões ou emendas, basicamente, podem ser feitas de duas maneiras. A primeira é fundir a fibra óptica através do aquecimento feito por um arco elétrico controlado (Lizuka, 2008), e assim, manter-se a continuidade do mesmo material com índice de refração e diâmetro externo e do núcleo semelhantes sem a presença do ar entre os dois ramos de fibras emendadas. A segunda maneira é a conectorização mecânica através de adaptadores específicos, que garantem alinhamento e proximidade dos ramos a serem unidos, onde cada ramo da fibra a ser emendada deve dispor de conector compatível com o adaptador central. Apesar da primeira metodologia garantir uma perda de potência/sinal óptico muito baixo comparado com a conectorização mecânica, ela não atende todas as demandas de continuidade da camada física do sistema de transmissão. As interligações entre elementos ativos da rede de transmissão de dados é um exemplo da inviabilidade da emenda por fusão.

1.2 Objetivo e Contribuições

O principal objetivo deste trabalho é a análise criteriosa dos fatores mais relevantes nas perdas de sinal óptico na transmissão de dados especialmente na interface entre dispositivos. Essa análise visa simplificar as normas internacionais e os requisitos nacionais exigidos pela ANATEL necessários à comercialização. A dissertação contribui para o melhor entendimento das exigências comerciais de eficiência óptica atuais, e também estimula o aperfeiçoamento da rede de comunicação óptica de dados quanto as perdas ópticas nas conectorizações mecânicas.

Utilizou-se os equipamentos e estrutura física do LTET na UNIFEI para a realização do trabalho, os resultados obtidos desta pesquisa foram publicados em

(Pereira, Fuly, Rodrigues, & Nobuyasu Junior, 2023). No artigo é apresentado uma análise de diversos ensaios regulamentares para certificação de conectores ópticos sob os parâmetros ópticos essenciais na comunicação óptica, perda por inserção (PI) e perda por retorno(PR).

1.3 Metodologia de Pesquisa

A metodologia deste trabalho é apresentada a seguir:

- Revisão bibliográfica e estudo teórico do comportamento da luz na transmissão de dados através dos principais parâmetros ópticos relevantes na comunicação através da fibra óptica.
- Revisão bibliográfica e estudo dos parâmetros ambientais, mecânicos e instrumentais mais relevantes para análise dos resultados obtidos com a técnica atual utilizada.
- Análise de resultados obtidos de diversos ensaios de certificação de conectores ópticos comercializados no Brasil oriundos de diversos fabricantes nas quais são baseados nos requisitos da ANATEL. Além disso, foi analisado ensaios e medições variando-se parâmetros climáticos.

1.4 Organização do Trabalho

O Capítulo 2 apresenta uma revisão da literatura, contendo as principais características da propagação em fibra óptica como a propagação da onda eletromagnética, modos guiados e vantagens da propagação utilizando a fibra óptica como guia de onda. Também são apresentados os elementos essenciais para a transmissão de dados, sendo eles as fontes ópticas, detectores, além de caracterizar os parâmetros ópticos ensaiados.

O Capítulo 3 apresenta a metodologia da análise feita nessa dissertação descrevendo como foram conduzidos os testes. Apresentando tanto a estrutura física e equipamentos utilizados, como os requisitos e normas empregadas no processo de teste.

O Capítulo 4 apresenta os resultados obtidos com os ensaios realizados. Foi realizado, primeiramente, uma análise a partir de diversos resultados de ensaios obtidos de fabricantes de conectores nacionais, e, em sequência, utilizou-se da

variação do tempo de exposição do ensaio de ciclos climáticos para obter algumas conclusões.

O Capítulo 5 conclui este trabalho, apresentando sugestões para possíveis pesquisas para a continuação do trabalho.

2 REVISÃO TEÓRICA

Este capítulo apresenta os principais conceitos envolvidos na comunicação de dados baseados na fibra óptica como guia de onda descrevendo o funcionamento básico das fontes e detectores ópticos, assim como, a transmissão no meio. Também são apresentados os parâmetros ópticos de interesse desse trabalho, perdas de inserção e perdas de retorno.

2.1 PROPAGAÇÃO EM FIBRAS ÓPTICAS

Atualmente conseguem-se perdas muito pequenas de potência em uma fibra óptica, podendo chegar até em torno de 0,20 dB/km para comprimentos de onda próximos de 1,55 μm . A redução obtida nas versões atuais, comparada aos primeiros resultados experimentais, foi principalmente devida ao aperfeiçoamento em materiais, novas tecnologias de fabricação, escolha de melhores comprimentos de onda, entre outros fatores (Ribeiro, 2013). No processo de desenvolvimento, as fibras à base de sílica sofreram alterações com os acréscimos de materiais dopantes que tornaram o meio de transmissão mais adequado aos comprimentos de onda experimentados na faixa do infravermelho. Todo o processo de desenvolvimento juntamente com a redução nos custos de fabricação foram fatores relevantes para um melhor custo/benefício dos sistemas de transmissão via fibra óptica. Com o desenvolvimento, identificaram-se várias outras vantagens que justificaram o grande crescimento desses sistemas.

Além de melhores condições de transmissão, a fibra óptica possui maior resistência à tração do que o fio de aço de mesmo diâmetro e tem menor peso do que os condutores metálicos. Como o meio de transmissão é um material dielétrico, não há possibilidade de indução de corrente a partir de fontes externas. Em consequência, a transmissão não é susceptível de interferências eletromagnéticas. Da mesma maneira, como a fibra óptica não irradia a onda que é guiada em seu interior, não há possibilidade de interferência em sistemas próximos.

Na constituição dos cabos, as fibras são protegidas por camadas de acrilato e resinas silicônicas para garantir que eventuais esforços externos não sejam transmitidos sobre a fibra e que pudessem causar fraturas ou deformações que

levassem ao aumento na perda de potência. Na Figura 2.1 tem-se um esquema típico da construção de um cabo óptico para sistemas de elevada capacidade.

Há algumas camadas de proteção na Figura 2.1, externas ao núcleo (Ribeiro, 2013). No núcleo é onde o feixe de luz é guiado, seguindo uma direção resultante paralela ao eixo longitudinal.

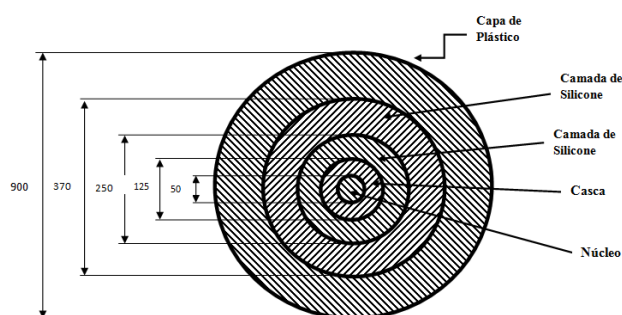


Figura 2.1 - Vista em corte transversal de uma fibra óptica típica. Unidades em µm.
Fonte: Autor.

2.2 TEORIA DA TRANSMISSÃO POR FIBRA ÓPTICA

2.2.1 Reflexão e refração da onda eletromagnética

A onda eletromagnética, resultado das induções mútuas entre os campos elétrico e magnético, foi proposta por Maxwell em meados do século XVIII. Esses campos deslocam-se no espaço, transportando a energia eletromagnética. Existem diferentes maneiras de originar a onda eletromagnética. Para as fontes usuais empregadas em sistemas de transmissão óptica, é obtida a partir da transição de elétrons nas camadas de energia dos átomos. As ondas eletromagnéticas quando incidem na fronteira de dois meios, parte de sua energia retorna ao primeiro meio e forma a onda refletida e parte de sua energia é transferida para o segundo meio, constituindo a onda refratada. Este comportamento é fundamental na descrição da fibra óptica e está esquematizado na Figura 2.2 .

Os fenômenos associados à transferência da energia eletromagnética na separação entre dois meios obedecem a conhecidas leis da física. Uma delas, que resume a denominada *lei da reflexão*, estabelece que as direções de propagação da onda refletida e da onda incidente estão em um mesmo plano e o ângulo de reflexão θ_r é igual ao de incidência θ_i , tomando como referência a normal à interface dos dois meios, como na Figura 2.2 .

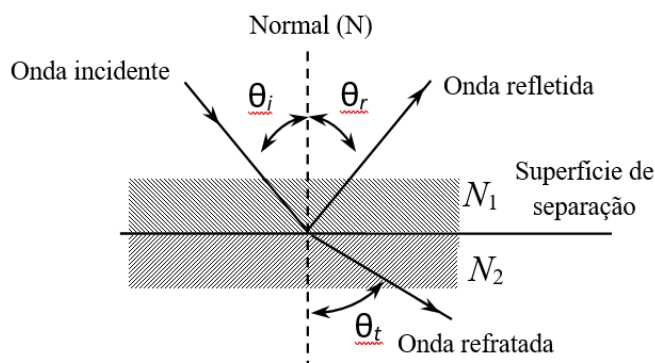


Figura 2.2 – Interface de uma onda eletromagnética na interface de dois meios.
Fonte: Autor.

Além disso, foi verificado que existe reflexão total da onda no limite de separação entre dois meios dielétricos para valores de ângulo de incidência maior que certo ângulo crítico. A lei da refração ou lei de Snell (Mickelson, 1993),

$$\frac{\text{Sen}\theta_i}{\text{Sen}\theta_t} = \frac{N_1}{N_2} \quad (1)$$

indica a relação entre o ângulo de refração e o ângulo de incidência. Quando o índice de refração do meio 1 (N_1) for maior do que no meio 2 (N_2), existe um ângulo de incidência para o qual a refração fica com 90° em relação à normal. A partir deste valor, não há mais transferência de energia para o segundo meio. Portanto, a onda incidente é totalmente refletida. Este valor particular do ângulo de incidência é denominado *ângulo crítico* (θ_c). Para incidência maior do que o ângulo crítico, o campo no segundo meio torna-se evanescente, com amplitude que decresce exponencialmente na direção normal à interface e desloca-se paralelamente a ela. Como a estrutura da fibra indica um núcleo com índice de refração maior do que o da casca, o feixe refletido na interface das duas regiões é sucessivamente refletido em toda sua extensão, formando o feixe óptico guiado no núcleo.

2.2.2 Descrição da fibra óptica

A fibra óptica tem formato de uma estrutura cilíndrica, cujo corte transversal está na Figura 2.1 e com uma representação longitudinal mostrada na Figura 2.3. Nessa representação, mostra-se a incidência de feixe óptico com um ângulo ϕ_1 em relação à normal à superfície de separação entre a face de entrada e o ar. Para garantir a transmissão pelo núcleo, é necessário que o ângulo de incidência na sua interface

com a casca seja igual ou maior do que o ângulo crítico. Para isto, na superfície de separação entre a face do núcleo e o ar o ângulo de incidência deve ser igual ou menor do que certo valor específico que depende das características da fibra. O seno deste ângulo deve ser no máximo igual ao parâmetro designado como *abertura numérica* da fibra (*AN*) (Snyder & Love, 1983), determinada por:

$$AN = \sqrt{N_1^2 - N_2^2} \quad (2)$$

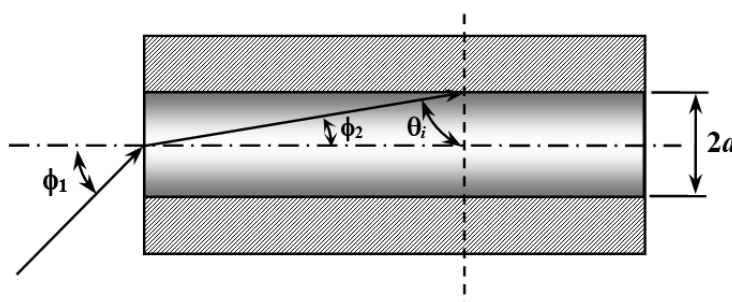


Figura 2.3 - Representação longitudinal da fibra óptica com indicação dos parâmetros que define sua abertura numérica.

Fonte: Autor.

Este ângulo máximo ($\phi_{1máx}$) deve ser considerado em todos os planos que passam pelo eixo longitudinal. Portanto, determina um *cone de captação* na face da fibra com abertura $2\phi_{1máx}$, isto é,

$$2\phi_{1máx} = 2\arcsen(AN) \quad (3)$$

e está representado na Figura 2.4. Caso a incidência na face de entrada ultrapassar este limite, na interface do núcleo com a casca o ângulo de incidência fica menor do que o valor crítico e parte da energia é transferida para a casca a cada reflexão. Após certa distância, praticamente já não há transmissão deste feixe pelo núcleo. Portanto, as direções de incidência na face de entrada que tiverem este comportamento têm suas energias vazadas para a casca e, conseqüentemente, afetam a eficiência global da fibra.

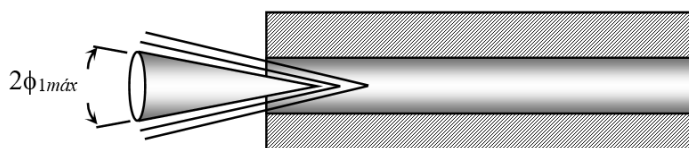


Figura 2.4 - Ângulo de captação na face da fibra, determinado pela sua abertura numérica.

Fonte: Autor.

2.2.3 Modos guiados

Os *modos de propagação* referem-se às várias distribuições do campo elétrico e magnético do feixe óptico no plano transversal à direção de propagação. Cada uma destas distribuições está associada a um percurso de propagação no núcleo. Observa-se que nas sucessivas incidências e reflexões, há ocorrências de interferências construtivas e destrutivas, dependendo das fases dos campos associadas aos percursos e aos argumentos resultantes nas reflexões. Quando houver interferência destrutiva, o feixe correspondente é transferido para a casca e as interferências construtivas resultam nos modos guiados pelo núcleo. A quantidade de modos guiados depende do comprimento de onda, da geometria do núcleo e dos índices de refração de núcleo e casca. Para determinação desta quantidade, determina-se o chamado *número V* (CHUANG, 2009) ou *diâmetro normalizado* do núcleo por meio de:

$$V = \frac{2\pi a}{\lambda_o} \sqrt{N_1^2 - N_2^2} = \frac{2\pi a}{\lambda_o} AN \quad (4)$$

sendo λ_o o comprimento de onda do feixe óptico, medido no vácuo, a o raio do núcleo e AN a abertura numérica.

Quando o número V for elevado, muitos modos propagam-se pelo núcleo e tem-se o modelo conhecido como *fibra multimodo* (Smith, King, & Wilkins, 2007). Demonstra-se que nas fibras com índices de refração constantes no núcleo e na casca, a quantidade de modos guiados é aproximadamente

$$N_M \cong \frac{1}{2} V^2 = 2 \left(\frac{\pi a}{\lambda_o} AN \right)^2 \quad (5)$$

Por sua estrutura cilíndrica, a descrição matemática da equação de onda guiada envolve combinações das funções de Bessel e de Hankel (KEISER, Optical Fiber Communications, 2008). Portanto, cada modo guiado tem seu comportamento regido por estas funções. Quando o número V ficar menor do que 2,405 (primeira raiz da função de Bessel de primeira espécie de ordem zero), apenas um modo pode ser transmitido pelo núcleo e tem-se a chamada fibra monomodo. Esta distribuição de campo corresponde ao modo dominante na fibra óptica. Portanto, para a condição de modo único é exigido que o diâmetro do núcleo satisfaça à condição

$$2a < \frac{2,405\lambda_o}{\pi AN} \quad (6)$$

Um dos comprimentos de onda nos quais a fibra apresenta pequena atenuação é em 1,3 μm . Para os valores usuais de abertura numérica, implica em fibra com diâmetro inferior a 10 μm para operação em monomodo. Para diâmetros superiores, em princípio seria possível existir um modo guiado para cada ângulo de incidência na interface do núcleo com a casca e que fosse igual ou superior ao valor crítico (ϕ_2 na Figura 2.3). Para diferenciá-los do modo dominante, são designados *modos superiores*. Conforme a descrição do número V , a quantidade de modos dependerá da diferença entre os índices de refração, que costuma ser quantificada pelo valor

$$\Delta = \frac{N_1^2 - N_2^2}{2N_1^2} = \frac{(N_1 + N_2)(N_1 - N_2)}{2N_1^2} \cong \frac{(N_1 - N_2)}{N_1} \quad (7)$$

e a aproximação foi adotada porque os índices de refração de núcleo e casca são muito próximos entre si (Ribeiro, 2013). Valores típicos são $N_1 = 1,515$ e $N_2 = 1,510$.

O número de modos guiados em uma fibra óptica é relevante em diversos momentos. Por exemplo, em projetos de redes industriais de computadores e em sistemas de telecomunicações, a transmissão multimodo implica em alterações na forma do sinal transmitido, que define a *dispersão intermodal*, *dispersão de modo* ou de *múltiplos percursos*. Este fato leva a um aumento na duração dos pulsos de modulação do feixe óptico guiado, responsável por aumento na taxa de erro de bit da mensagem. Neste particular, a fibra com menor quantidade de modos garante maior confiabilidade da transmissão.

Na fibra monomodo, não se computam os efeitos da dispersão intermodal. Todavia, pode aparecer a denominada *dispersão intramodal* ou *dispersão cromática* quando a fonte de luz não for perfeitamente coerente. Nestas condições, o índice de refração modifica-se ligeiramente para os diferentes comprimentos de onda e o feixe sofre nova modificação ao longo da fibra. Este fato é bem reduzido com operação no comprimento de onda próximo de 1300 nm, uma das regiões de baixa atenuação da fibra, e a fabricação de fontes ópticas com pequeníssima largura espectral. Esta característica tem sido alcançada com os modernos diodos lasers para modulações

com elevadíssimas taxas. Relatam-se dispositivos capazes de processar sequências de vários gigabits por segundo.

2.2.4 Vantagens de transmissão via fibra óptica

A fibra óptica apresenta vantagens significativas na transmissão de sinais nas modernas redes de comunicações. Entre essas vantagens, destaca-se a imunidade a ruídos causados por equipamentos próximos. Trata-se de uma característica importante em certos ambientes, como em instalações industriais que operam com elevadas correntes nos seus equipamentos. Por causa das pequenas perdas na transmissão (tipicamente inferior a 0,5 dB/km em fibras monomodo) (KEISER, 2008) uma instalação com fibra óptica permite maior extensão em um enlace sem emprego de repetidores. Outra vantagem refere-se à possibilidade de transmissão de um feixe óptico modulado com altas taxas de transmissão (superior a 1Gbit/s) e baixíssima taxa de erro de bit (tipicamente da ordem de 10^{-9}).

Não há só vantagens qualitativas referentes ao sinal transmitido, mas também existem as relativas à inserção da fibra óptica no ambiente de interesse. Destacam-se duas maneiras de associar a transmissão óptica em uma rede de computadores. Pode partir de um projeto novo ou envolver a adaptação a um sistema já existente que utilize cabos metálicos em sua versão original. Neste caso, a estratégia para a modernização impõe uma inserção gradativa dos cabos ópticos. Exige-se uma compatibilidade dos dispositivos ativos da rede, como transceptores ópticos internos que processem o sinal elétrico no domínio óptico, recompondo-o no processamento final. Estão disponíveis transceptores, como o equipamento que faz a interface entre o sistema elétrico e o sistema óptico (GBIC, *gigabit interface converter*) [(Optocore, 2018), (Intelbras, 2018)] ou a unidade encaixável de pequeno formato (SFP, *small form-factor pluggable*), que se refere a um subsistema adaptável diretamente à rede, sem sua desativação (Perle, 2018).

2.2.5 Causas da degradação do feixe óptico transmitido

2.2.5.1 Considerações gerais

Para o projeto de um sistema de transmissão que envolva fibras ópticas, a distância entre repetidores é fundamental sob diversos aspectos, incluindo o custo do

projeto. Assim, a *atenuação*, que mostra a redução na amplitude do campo óptico, e a *dispersão*, responsável pela modificação na forma dos pulsos de modulação, devem ser devidamente quantificados. Estes inconvenientes têm importância nos custos envolvidos e na garantia de qualidade do sinal que chega ao receptor. Normalmente, a potência óptica aplicada à fibra envolve valores da ordem de dezenas ou centenas de microwatts. Por conseguinte, as degradações no sinal guiado pela fibra devem ser mantidas em limites tais que não comprometam o processamento da informação no lado do receptor. Para uma correta avaliação dos efeitos das degradações sobre a transmissão, é conveniente conhecer suas causas e consequências.

2.2.5.2 Atenuação

A potência decresce exponencialmente ao longo da fibra e é representada por uma relação que envolve os seus valores na entrada e na saída. Geralmente, esta relação é especificada em Decibel. Fatores ligados à produção da fibra podem contribuir para a perda final. Entre essas causas, destacam-se o grau de pureza do núcleo, absorção pelo cristal básico dessa parte da fibra e micro curvaturas originadas em diferentes fases da fabricação (Ribeiro, 2013) & (KEISER, 2008). No trecho inicial, podem surgir modos no núcleo que escapam para a casca e não serão utilizados na transmissão, conhecidos como *modos vazantes* ou *vazados* (*leakage modes*). Além disto, em sua instalação aparecem outros fatores que também são responsáveis pela degradação do feixe óptico. Citam-se a qualidade das emendas e dos conectores, perdas em curvaturas, reflexões na entrada, na saída e em eventuais descontinuidades ao longo do trecho, como as resultantes de minúsculas diferenças de diâmetros em emendas, deslocamentos axiais ou transversais, etc.

De maneira geral, a temperatura em que a fibra estiver submetida tem pouca influência em sua atenuação, pois há poucas alterações em suas características. Entretanto, como a fibra é envolvida por capas protetoras de materiais diferentes, com coeficientes de dilatação térmica próprios, isto pode causar pressões adicionais sobre o núcleo causando micro curvaturas.

Em adição a todos estes fatos, deve ser considerada outra perda causada por espalhamento do feixe ao longo da fibra. O espalhamento global é originado por diferentes processos e os mais comuns são os espalhamentos de Rayleigh, de Brillouin, de Raman. Todos podem contribuir para acréscimo da perda no núcleo. O

espalhamento de Rayleigh é relacionado à própria estrutura da fibra, causado por minúsculas imperfeições com separações pequenas em relação ao comprimento de onda. O fenômeno introduz uma perda inversamente proporcional à quarta potência do comprimento de onda (Liu, 2005). Levando em conta vários fatores responsáveis pela perda, seu valor numérico pode ser representado pela equação

$$L_t = \frac{S}{\lambda^4} + \frac{B}{(AN)^6} + Af_a \quad (8)$$

em que S , A e B são constantes de proporcionalidade típicas de cada fibra, a primeira parcela indica a influência do espalhamento de Rayleigh, a segunda inclui os efeitos de micro curvaturas e dos acoplamentos na entrada e saída do feixe óptico e o terceiro termo é relacionado com as perdas por absorção de energia pelo núcleo.

2.2.5.3 Dispersão

Juntamente com a atenuação, alterações no formato dos pulsos de modulação do feixe óptico também são fatores de degradação ao longo do enlace. O fenômeno é conhecido como *dispersão* e aumenta o tempo de duração dos pulsos transmitidos. Em uma sequência de bits transmitidos, este alargamento temporal pode causar superposição entre partes dos pulsos consecutivos. Esta interferência intersimbólica pode resultar em erro de bit na recuperação do sinal transmitido. Para se reduzir o problema, os pulsos de modulação devem ser mais separados no tempo, mostrando que a dispersão limita a taxa de transmissão.

Existem diferentes causas para a dispersão e algumas merecem destaques. Em fibras de tipo multimodo, deve-se considerar a dispersão intermodal, resultante do fato de cada modo guiado propagar-se com velocidade ligeiramente diferente dos demais (COSTA, 2018). Este fenômeno é mostrado na Figura 2.5, sendo que em t_0 representa-se o momento inicial de emissão do feixe óptico modulado.

Ao penetrar na fibra, admitiu-se seu desdobramento em três modos, para fins de ilustração, pois em uma fibra multimodo a quantidade é sempre muito superior. No instante t_i , mostra-se a diferença de tempo de propagação de cada um desses modos. Em consequência, mesmo para a excitação com um feixe de luz monocromática, a combinação desses modos na extremidade da fibra resultará em formato diferente do aplicado em sua excitação.

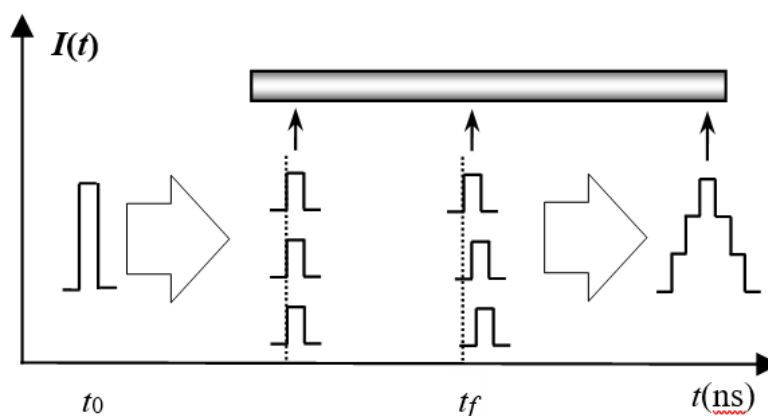


Figura 2.5 - Esquema ilustrativo da dispersão intermodal, admitindo a formação de três modos de propagação na fibra óptica. Fonte: Autor.

É importante, ainda, lembrar que o índice de refração dos materiais depende do comprimento de onda que nele se propaga. Por outro lado, uma fonte óptica verdadeira gera um comprimento de onda dominante e vários outros em torno deste valor, com menores amplitudes. Para cada um desses comprimentos de onda, a fibra apresenta índice de refração próprio, indicando que sua velocidade de propagação será ligeiramente diferente, mesmo que esteja ocorrendo um único modo na transmissão. Mais uma vez, a composição das várias partes em sua extremidade implicará em aumento na duração do pulso transmitido. Este fenômeno caracteriza a *dispersão intramodal* ou *dispersão de material*. Observa-se que este fenômeno ocorre também para cada modo na fibra multimodo. Além disto, em dado modo de propagação, com sua própria frequência de corte, comprimentos de onda diferentes deslocam-se com velocidades diferentes. Este mecanismo causa a *dispersão de guia de ondas* ou *dispersão de onda guiada*. Em outras situações, consideram-se, ainda, a dispersão de modo de polarização (PMD, *polarization mode dispersion*), dispersões por efeitos não-lineares, etc (KEISER, 2008).

De resultados experimentais, verifica-se que os efeitos de dispersão de material e de guia de onda tendem a se cancelar em um comprimento de onda específico. Em consequência, ocorre a menor dispersão na fibra óptica, oriunda das demais causas (MITSUBISHI ELECTRIC, 2018). Foi observado que com a dopagem da sílica com dióxido de germânio e a inserção de camadas adicionais de vidro entre o núcleo e a casca, obtiveram-se resultados satisfatórios na diminuição da dispersão em certas faixas de comprimento de onda. Esses resultados podem até ser abaixo de 2

ps/nm.km. Desta maneira, será possível a transmissão com elevadíssimas taxas de modulação sem prejuízo da qualidade na recepção.

2.3 FONTES ÓPTICAS

2.3.1 Características gerais

Entre as características determinantes de desempenho do diodo laser (LD, *laser diode*) cita-se a sua *largura espectral*. Este parâmetro refere-se à faixa de comprimentos de onda emitidos pela fonte. Em termos qualitativos, a emissão de uma fonte óptica tem o aspecto da Figura 2.6, indicando o nível relativo da intensidade óptica em função do comprimento de onda.

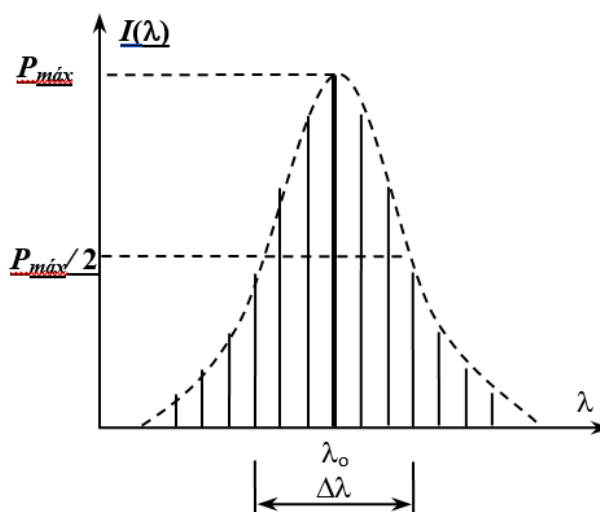


Figura 2.6 - Comportamento típico de uma fonte de luz empregada em sistemas de comunicações ópticas. Fonte: Autor.

A distribuição de intensidade em função do comprimento de onda segue uma curva aproximadamente gaussiana. A largura espectral costuma ser especificada pela diferença entre os comprimentos de onda para os quais a intensidade óptica cai de 3dB (metade da potência) em relação ao comprimento de onda de maior intensidade. Modernamente, há diodos lasers para os quais a largura espectral é fração de nanômetros para um comprimento de onda central de 1550 nm e o valor final tem sido apresentado como *largura de linha*. Nos diodos emissores de luz, a largura espectral é muito maior, chegando à casa das dezenas de nanômetros (Arakawa & Yariv, 1986). Nos últimos anos, os fabricantes de diodos lasers focalizaram os esforços em desenvolvimento de dispositivos para muitas aplicações, incluindo os sistemas de comunicações ópticas.

2.3.2 Diodos lasers para sistemas de alta capacidade

Entre importantes fontes ópticas que permitem elevada taxa de modulação e com valores elevados de potência de saída, citam-se os modelos da série ML8622S e ML8922, da Mitsubishi Electric. Esses dispositivos apresentam níveis de potência até superiores a 100mW, largura espectral($\Delta\lambda$) inferiores a 1nm, suficientemente pequena para permitir modulações superiores a 2Gb/s em modulação direta, isto é, com variação da corrente de polarização do dispositivo a partir da sequência de bits aplicada (LASERTECHNIK, 2018). Estas larguras espectrais são comuns em modernos dispositivos para operações em 1300 nm e 1550 nm, desenvolvidos por meio de diferentes tecnologias de fabricação, como o laser de camada enterrada, o laser com realimentação distribuída (*distributed feedback*, DFB), o laser de poço quântico (*quantum well laser*, Q'WL), o laser de cavidade vertical. Eles permitem a geração de um feixe de luz com um modo dominante e os demais atenuados rapidamente, garantindo uma seleção entre o nível de potência desejado e os indesejáveis superiores a 40 dB. Desde o início de seus desenvolvimentos, verificou-se que são possíveis diodos lasers de poço quântico e de realimentação distribuída com larguras espectrais da ordem dezenas de mega-hertz e em torno do comprimento de onda de 1,5 μ m. Isto implica em poucos picômetros de largura espectral em termos de comprimento de onda (PICOQUANT, 2018) & (FINISAR., 2018).

Tais dispositivos apresentam tempo de subida extremamente pequeno, o que permite seu chaveamento em intervalos de tempo muito reduzidos e modulações com elevadíssimas taxas de transmissão. Essas modulações têm crescido ainda mais com o emprego de moduladores externos que empregam o interferômetro de Mach-Zehnder. Na Figura 2.7, tem-se uma representação da resposta espectral típica destes modelos de diodos lasers.

Existem diodos lasers com este tipo de desempenho capazes de responder a pulsos com durações de pico-segundos ou modulações direta em onda contínua até em torno de alguns giga-hertz (SATO, 2005). Na Tabela 1, encontram-se características de alguns dispositivos modernos encontrados no mercado. Estão destacados alguns valores típicos para o laser de Fabry-Perot (FP) que emprega uma cavidade ressonante constituída por dois espelhos semi-reflexivos em suas extremidades, o laser de realimentação distribuída, o poço quântico e o cavidade vertical.

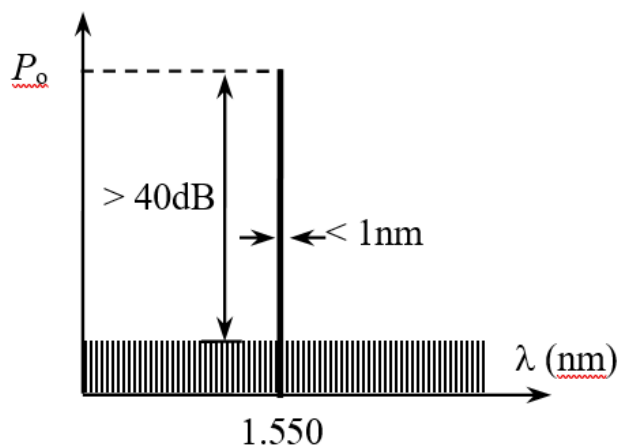


Figura 2.7 - Resposta espectral típica de um diodo laser monomodo para elevadas taxas de modulação. Fonte: Autor.

Tabela 1 - Características dos principais lasers típicos aplicados em comunicações ópticas.

Tipo	λ (nm)	$\Delta\lambda$ (nm)	$P_{\text{máx}}$ (mW)	t_r (S)
FP [(WSI, 2018)]	1.310	1,50	2,5	140
DFB [(MILMAN & GRABEL, 2009)]	1.584	0,01	10	120
QWL	1.550	0,01	5	130
VCSEL [(KEISER, 2010)]	1.550	0,10	7	100

2.4 DETECÇÃO DO FEIXE ÓPTICO MODULADO

2.4.1 Funcionamento do fotodetector

Assim como se necessita de equipamentos para emissão de sinais em uma ponta da fibra óptica, também se precisa de equipamentos adequados no lado oposto para a recuperação dos sinais. Um dos componentes para cumprir este objetivo é o fotodetector. Existem diferentes modelos e todos visam cumprir a exigência de elevada sensibilidade no comprimento de onda do feixe óptico transmitido. Os mais comuns são constituídos por junções *pn* e identificados como *diodos fotodetectores*. Em geral são diodos semicondutores polarizados reversamente, de maneira que, sem a incidência de luz, a corrente circulante fica muito pequena, sendo determinada apenas pelos portadores minoritários de carga existentes nos cristais dopados (TANENBAUM & WETHERALL, 2011) . Na análise dos fenômenos envolvendo o feixe óptico, este pequeno fluxo de cargas identifica a *corrente de escuro* (*dark current*) e contribuirá para introdução de certa potência de ruído na recepção (KEISER, 2008).

Fundamentalmente, os fotodetectores de junção baseiam-se na liberação de elétrons da banda de valência do semicondutor para a banda de condução, sob o

efeito do feixe óptico incidente. Com isto, haverá grande crescimento nas quantidades de cargas móveis nas duas bandas de energia. Com a polarização reversa, aumenta-se o fluxo de cargas, formando a *fotocorrente* ou *corrente foto gerada*. Para ocorrer a transferência de elétrons entre as duas bandas dos semicondutores, os fótons incidentes devem ter energia igual ou superior à diferença entre as bandas de condução e de valência. A Figura 2.8 é um esquema representativo do fenômeno. De acordo com a lei de Planck, a energia de um fóton é $E_{ph} = hc/\lambda$, sendo h a constante de Planck ($6,626 \times 10^{-34}$ J.s), c é a velocidade da luz no vácuo (3×10^8 m/s) e λ é o comprimento de onda em metros (Smith, King, & Wilkins, 2007).

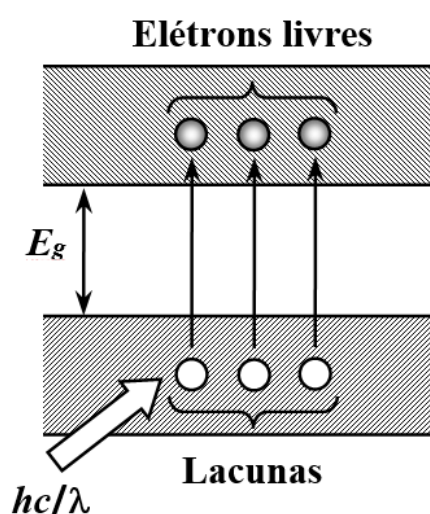


Figura 2.8 - Esquema da transferência de elétrons sob a ação do feixe óptico incidente com energia superior à da banda proibida. Fonte: Autor.

Em análises envolvendo os semicondutores, os níveis de energia costumam ser especificados em eletrons-volt (eV) e o comprimento de onda em micrometros (μm). Utilizando as transformações pertinentes, esta lei aparece como:

$$E_{ph}(\text{eV}) = \frac{1,241}{\lambda(\mu\text{m})} \quad (9)$$

Assim, para ocorrer a liberação de elétrons da banda de valência para a de condução, esta energia deve ser maior do que a da banda proibida do material (E_g). Isto permite identificar um comprimento de onda máximo para o qual o dispositivo pode ser empregado na ação como fotodetector. Resulta que

$$\lambda(\mu\text{m}) \leq \frac{1,241}{E_g(\text{eV})} \quad (10)$$

2.4.2 Parâmetros relevantes para os fotodetectores

Na avaliação das ações do fotodetector, são necessários alguns parâmetros que determinam o seu desempenho. Destacam-se, por exemplo, a *eficiência quântica* (η_q) e a *responsividade* (R). A eficiência quântica estabelece uma relação entre o número de elétrons liberados e a quantidade de fótons que penetra no material, ambos tomados por unidade de tempo (Kuzmany, 2009). Portanto, tem-se:

$$\eta_q(\%) = \frac{N_{re}}{N_{rph}} \times 100\% \quad (11)$$

Nesta equação, N_{re} refere-se à quantidade de elétrons liberados por segundo e N_{rph} à a quantidade de fótons incidentes por segundo. Em geral, este parâmetro relaciona-se ao comprimento de onda e anula-se no comprimento de onda de corte, definido pelo limite máximo de (10). Uma representação típica destes valores está na Figura 2.9.

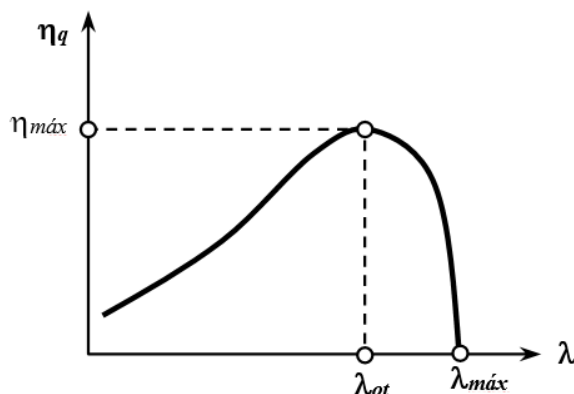


Figura 2.9 - Comportamento típico da eficiência quântica de um dispositivo semiconductor em função do comprimento de onda.

Para que seja formada a fotocorrente, os elétrons são originários de diversas partes do dispositivo, com predominância dos formados na região de depleção. Percebe-se que à medida que os fótons penetram no meio e forem absorvidos, a quantidade por unidade de tempo diminui, segundo uma lei exponencial que depende do *coeficiente de absorção do meio* (α), expresso em nepers por metro (Np/m). Logo, reduz-se, também a quantidade de elétrons transferidos no mesmo intervalo de tempo. Leva-se em conta, também que parte da energia incidente no dispositivo é refletida, segundo as leis da reflexão e da refração. Este fato pode ser minimizado com a adição de uma película antirrefletora com o objetivo de reduzir o fenômeno. Ainda assim, deve-se prever um *coeficiente de reflexão* R_r de potência que relaciona

a potência que penetra no dispositivo e a potência do feixe óptico incidente. Admitindo como N_{inc} a quantidade de fótons incidentes por segundo, a potência correspondente vale $P_o = N_{inc}hc/\lambda$. Logo a potência refletida na interface do dispositivo com

$$P_a = N_{inc} \frac{hc}{\lambda} (1 - R_r)(1 - e^{-\alpha x}) \quad (12)$$

sendo x a distância percorrida dentro do fotodetector (Kuzmany, 2009). Esta potência é absorvida na formação da fotocorrente e em outros fenômenos relacionados ao meio, como dissipação sob a forma de calor ou liberação de elétrons que serão novamente combinados com lacunas do meio.

Como a quantidade de elétrons liberados formam a fotocorrente (I_p), é conveniente avaliar a relação entre essa corrente e a potência do feixe óptico incidente (P_o). Este parâmetro é identificado como *responsividade* do fotodetector (R), expresso em ampères por watt (A/W), ou um submúltiplo correspondente. Então, tem-se:

$$R = \frac{I_p}{P_o} = \frac{q/t}{N_{inc}hc/t\lambda} = \frac{N_{re}q_e}{N_{inc}hc/\lambda} = \eta_q \frac{q_e\lambda}{hc} \quad (13)$$

onde q_e representa a carga de um elétron ($1,602 \times 10^{-19}$ C). Este resultado demonstra que em um dado comprimento de onda, a responsividade é uma constante. Portanto, a fotocorrente detectada é diretamente proporcional à potência óptica do feixe incidente (Figura 2.10). Este fato demonstra que uma variação na potência óptica, causada pelo sinal de modulação na transmissão, é transferida para a fotocorrente detectada. Isto permite recuperar o sinal transmitido, passando-o para o domínio elétrico.

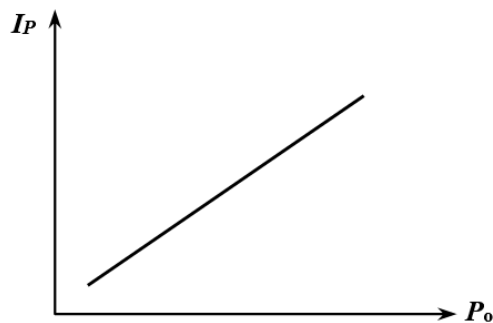


Figura 2.10 - Representação da fotocorrente gerada em função da potência óptica incidente no fotodetector. Fonte: Autor.

Em fotodiodos, a camada que recebe a incidência de luz deve-se ser bem estreita. O contrário deve acontecer com a região de exaustão, para que sejam potencializados o aproveitamento de fótons, tanto de baixa energia como de alta energia. Isso resulta em uma maior diversidade de comprimentos de onda dos fótons.

Nos fotodiodos *pin*, existem basicamente 3 canais, dois mais finos, as regiões *p* e *n*, e uma mais larga, conhecida como região de exaustão ou cristal intrínseco, onde pode ser um cristal do tipo *p* ou *n* com pouca dopagem. O grande intuito do desenvolvimento desse tipo de fotodetector foi a tendência em uma resposta a frequência de modulação mais elevada. Eles também podem operar com valores de tensão menores, entre 8 V e 10 V, enquanto que os diodos *pn* originais, de 20 V à 40 V, assim proporcionam resposta em frequência mais estreita.

2.5 PARÂMETROS ÓPTICOS

Esse item foi abordado em três subitens, sendo que os dois primeiros explanam simplificadaamente os dois principais parâmetros de mensuração realizados nos experimentos práticos desse trabalho, PI e PR, e por último é detalhado as principais características envolvidas na conectorização mecânica que influenciam a eficiência dos itens explicados anteriormente.

2.5.1 Perda de Inserção - PI

A PI também conhecida como atenuação é a medida da redução do sinal de luz quando comparado com a potência de saída (P_{out}) pela potência de entrada (P_{in}), em que as medições são feitas na unidade de medidas decibéis (dB) (Al-Azzawi, 2006),

$$PI = -10 \text{Log}_{10} \left(\frac{P_{out}}{P_{in}} \right) \quad (14)$$

Para as superfícies ópticas paralelas, ou seja, nas extremidades dos cabos de fibra óptica ocorrem perdas de reflexões conhecidas como perda de Fresnel. Com o intuito de reduzir essas perdas, pode ser usado um gel com índice correspondente e revestimento antirreflexo. Esse gel é utilizado em equipamento de união temporário conhecido como alinhador de fibra nu, na qual não é necessário o uso de conectores.

2.5.2 Perda de retorno - PR

Na face final plana da fibra, uma onda refletida é produzida, logo, essa onda pode influenciar a potência de saída e a frequência da fonte do laser (Neumann, 2013). Diversos métodos para preparação da face final da fibra são utilizados, sendo que para algumas aplicações, aplica-se metodologias para reduzir o fator de reflexão, no entanto, o mais simples e eficiente é criar um ângulo de inclinação em relação ao eixo normal da fibra e fazer o lixamento e polimento da fibra neste ângulo. Isso faz com que o feixe de luz refletido seja separado em ângulo do feixe incidente e minimize flutuações de potência devido aos efeitos de interferência no espaço de ar entre as faces, embora não reduza a perda de Fresnel.

A PR também dada em dB e foco de estudo deste trabalho ocorre nos terminais dos cabos de fibra óptica, ou seja, no acoplamento mecânico através do uso de conectores e adaptadores próprios.

$$PR = -10 \text{Log}_{10} \left(\frac{P_r}{P_i} \right) \quad (15)$$

A razão entre a amplitude de um pulso refletido P_r e a de um pulso incidente P_i pode ser caracterizada por um coeficiente de reflexão devido à reflexão de pulsos na terminação de um meio confinante (Ibbotson, 1999). A proporção de energia de pulso refletida de volta para qualquer ponto é a PR .

Caso os terminais da fibra forem cortados e polidos com ângulo não equiparados com a face terminal do conector podem ocorrer perdas adicionais com falhas no sinal transmitidos e níveis ruídos aumentados (Al-Azzawi, 2006).

O diferença nos índices de refração nas fibras a serem conectadas conhecidas como reflexões de Fresnel são relevantes, porém, não são suficientes para explicar o aumento de PR para conectores cujo o polimento não apresenta inclinação nas faces terminais, como por exemplo, PC (*Physical Contact*) e UPC (*Ultra Physical Contact*). Além da inevitável variação dos índices de refração de fibras diferentes ou a variação causada devido ao polimento da interface finais das fibras, fatores como o estresse de contato de Hertz causado pela pressão de molas no corpo do ferrolho, ou rebaixamento e protrusão da fibra relacionado ao ferrolho influenciam na performance da conexão. Todavia, através de uma angulação de 8 graus com relação a secção transversal da fibra nos polimentos na face terminal, APC (*Angled Physical Contact*), existe uma redução drástica de 4% da reflexão da luz, ou seja, 96% da luz é

direcionada para fora através do revestimento. Isso evita o retorno da luz para a fonte de luz, e conseqüentemente, a redução das influências negativas na transmissão, como por exemplo, o aumento da taxa de erro de bit (LAMBRACHE, PEREIRA, & TOROBIN, 2011) e (Zhou, 2016).

2.5.3 Conectorização mecânica

A performance de um sistema óptico é muito influenciada por dispositivos ópticos de conexão, dentre eles os conectores. Eles são dispositivos usados para conectar o cabo de fibra óptica a outro dispositivo de fibra óptica, tais como, detectores, amplificadores ópticos, medidores de potência de luz óptica, ou até mesmo com outro cabo de fibra de maneira fácil e confiável (Al-Azzawi, 2006). Apesar de existirem diversos tipos de emendas mecânicas, a mais utilizada atualmente é a emenda por fusão. Elas possuem menores perdas, dimensões, estabilidade mecânica e imunidade a efeitos ambientais, quando comparadas com os conectores. Entretanto, a variedade de aplicações fez com que a indústria de telecomunicações desenvolvesse diversas técnicas para o aperfeiçoamento de sua performance para diversas aplicações. A conexão é o acoplamento de dois conectores, sendo que a performance dessa conexão é dependente da qualidade desses conectores (Heisler, 2021). A maioria dos conectores são construídos a partir de um ferrolho, responsável por segurar a porção final da fibra proporcionando o alinhamento, um material Epóxi usado para fixar o terminal do cabo de fibra no corpo do conector, um corpo do conector e um dispositivo aliviador de tensão feito de plástico ou borracha para a união entre o corpo do conector e o cabo de fibra. As conectorizações mecânicas possuem algumas características desejáveis típicas, conforme listada abaixo:

Baixa perda óptica de Inserção e Retorno: Espera-se que os conectores causem baixa perda de potência óptica através da junção entre um par de cabos de fibra.

Fácil instalação e uso: Os conectores devem ser fácil e rapidamente instalados sem a necessidade de ferramentas especiais ou treinamento intensivo.

Repetibilidade: Não devem existir variabilidade em potência óptica. As perdas devem ser consistentes em qualquer momento que um conector é conectado, desconectado e reconectado novamente, quantas vezes forem necessárias.

Econômico: O conector deve ser economicamente viável.

Compatibilidade com o ambiente: O conector deve apresentar resistência contra umidade e não ser afetados por variações de temperatura.

Propriedades Mecânicas: O conector deve apresentar alta resistência mecânica e durabilidade para sustentar as forças de aplicação e tensão.

Longevidade: O conector deve ser construído com um material que tem uma longevidade em várias aplicações

De acordo com (Lizuka, 2002), o maior desafio do projeto de conectores de fibra óptica é projetar conectores que possam ser produzidos em massa apesar das tolerâncias de usinagem severas. E para (Neumann, 2013), projetistas e fabricantes de conectores buscam uma a melhor precisão no alinhamento dos núcleos, de modo que duas fibras idênticas quando unidas sem desalinhamento geométrico não apresentam perda de potência. Entretanto, na realidade, existem dois tipos de perdas, as intrínsecas e as extrínsecas, pois as fibras são ligeiramente diferentes. A primeira ocorre devido a diferença de propriedade das fibras a serem unidas e distribuições de campo. Elas representam uma perda de 0,1 dB para uma incompatibilidade do *Spot Size* de 15% para quando as fibras se encontram alinhadas. O segundo tipo de perda é devido aos desalinhamentos causados pelo tamanho reduzido do núcleo. Sendo assim as perdas extrínsecas podem ser analisadas através de três critérios de desalinhamento: o deslocamento transversal (dos eixos do núcleo) (16), o deslocamento longitudinal (lacuna de comprimento) (17) e a inclinação dos polimentos (18), baseado nas equações de eficiência do acoplamento, apresentadas abaixo:

$$\eta = \exp \left[- \left(\frac{S}{w_G} \right)^2 \right] \quad (16)$$

Em que S é igual ao deslocamento transversal dos eixos da fibra, e w_G é igual *Spot Size* (raio do campo do modo fundamental),

$$\eta = \frac{1}{1 + \left(\frac{0,5Z_w}{Z_R} \right)^2} \quad (17)$$

em que Z_w é o comprimento da lacuna entre as faces terminais da fibra, e Z_R é uma variável dependente do índice de refração do ar, *Spot Size* e comprimento de onda luz,

$$\eta = \exp \left[- \left(\frac{\theta}{\theta_d} \right)^2 \right] \quad (18)$$

em que θ é o ângulo de inclinação entre os eixos de fibra de entrada e saída, e θ_d é o ângulo de divergência que também é dependente das mesmas variáveis que Z_r .

Por outro lado, para (Al-Azzawi, 2006) a atenuação do sinal é causada por diversos fatores além dos descritos acima, tais como, sobreposição do núcleo dos cabos da fibra, abertura numérica, polimento da extremidade do conector e reflexões na interface/junção do cabo de fibra. Analogamente ao (Neumann, 2013), nas equações (16), (17) e (18), ele também descreve as perdas nas uniões através das equações (19), (20) e (21), porém dado em dB. A equação (19), descreve a perda dada pela incompatibilidade de diâmetro P_{dia} , em que dia_t e dia_r , são o diâmetro do cabo de transmissão e recepção, respectivamente,

$$P_{dia} = 10 \text{Log}_{10} \left(\frac{dia_t^2 - dia_r^2}{dia_t^2} \right) \quad (19)$$

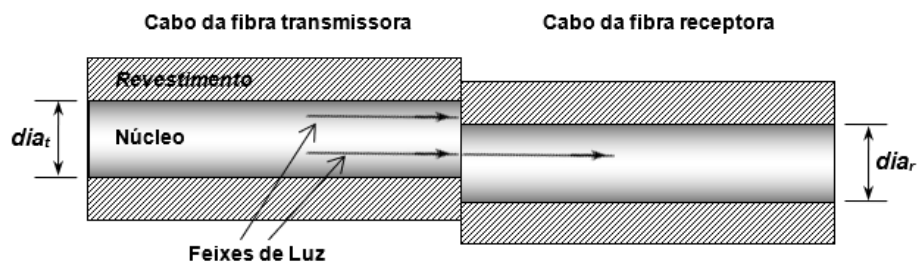


Figura 2.11 - Sobreposição de núcleos dos cabos de fibra. Fonte: Autor.

A equação (20), descreve a perda devido a incompatibilidade das aberturas numéricas (P_{NA}), sendo que NA_r é a abertura numérica do cabo de transmissão e NA_t é a abertura numérica do cabo de recepção

$$P_{NA} = 10 \text{Log}_{10} \left(\frac{NA_r}{NA_t} \right)^2 \quad (20)$$

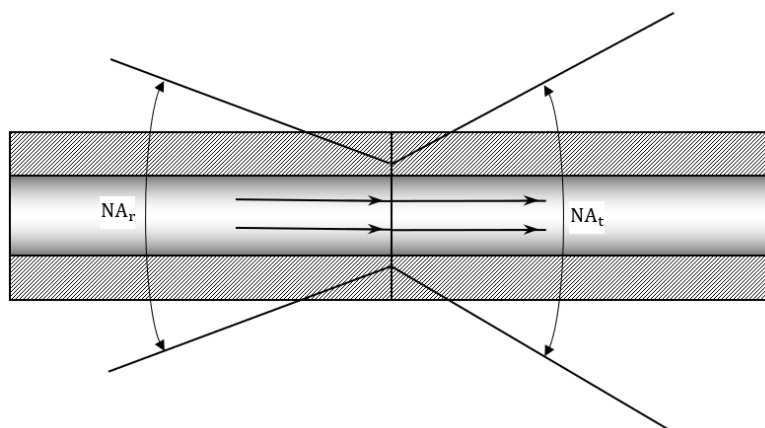


Figura 2.12 - Perda por incompatibilidade de abertura numérica. Fonte: Autor.

Por fim, (21) descreve a perda por separação (P_{sep}), ou seja, a perda devido ao afastamento longitudinal (lacuna de ar entre as interfaces de fibra óptica),

$$P_{sep} = 10 \text{Log}_{10} \left(\frac{\frac{d}{2}}{\frac{d}{2} + S \tan(\arcsin) \frac{NA}{n_o}} \right) \quad (21)$$

em que, d é o diâmetro do núcleo, S é o espaçamento entre as fibras e NA é a abertura numérica.

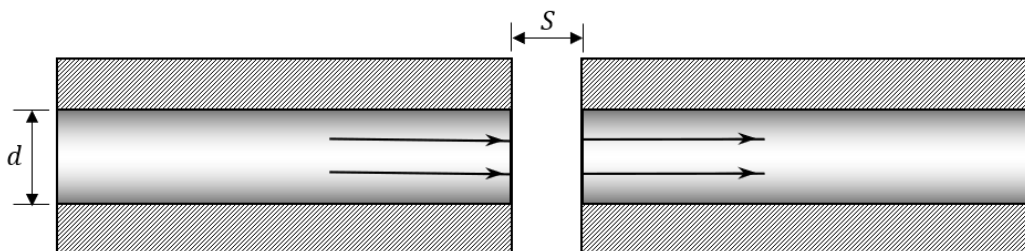


Figura 2.13 - Perda por separação das interfaces. Fonte: Autor.

Diante disso, outra questão relevante e crítica na análise da performance dos conectores são características mecânicas como por exemplo, durabilidade, resistência à intempéries ambientais e compatibilidade. Essas questões podem influenciar no aparecimento de sujeiras, tensionamento do cabo de fibra óptica, desalinhamento do núcleo devido a dilatação térmica, incompatibilidades pelo tipo de conector causando assim perdas óptica adicionais. Na Figura 2.14 podem ser observados dois conectores do tipo SC sem ângulo na interface final e um adaptador, necessário para o alinhamento da fibra óptica, antes e depois de serem acoplados.

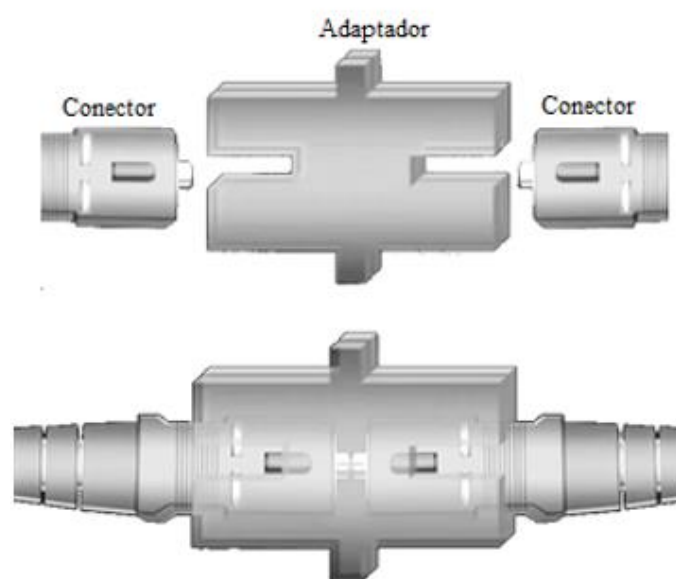
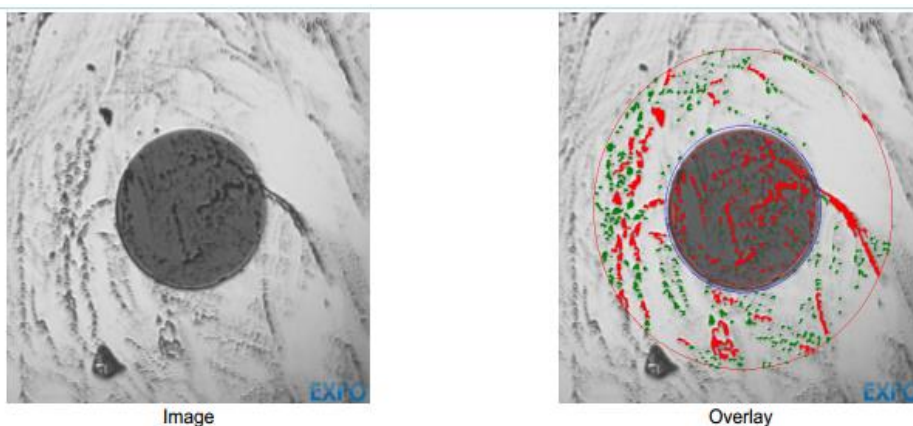


Figura 2.14 - Conexão mecânica de dois conectores de fibra óptica com a utilização de um adaptador.
Fonte: Autor.

De acordo com (N. & H., 1978), sempre haverá um deslocamento transversal residual do eixo central em relação ao eixo do ferrolho. Logo, a PI de um conector altera de maneira periódica, quando ocorrem sucessivas conectorizações nos dispositivos. Ademais, o deslocamento radial deve ser menor que 0,15 vezes a extensão do campo radial do campo do modo de fibra fundamental, conhecido como *Spot Size*, para se obter perdas de inserção menores que 0,1 dB.

Outra questão relevante no manuseio da fibra e conectorização dos terminais de fibra para uma boa eficiência na conectorização é a limpeza, seguido de inspeção via microscópico. A Figura 2.16 mostra exemplos de condições da face final da fibra óptica em que foi utilizado um microscópio de 400 vezes de ampliação em que apenas em (a) o conector está em condições de uso apropriados. Para visualização da superfície é necessário um software, que além de mostrar a imagem em tempo real, analisa a qualidade da superfície final do conector, baseado em norma (IEC 61300-3-35 *Fiber Optic Interconnect Devices and Passive Components - Basic Testing and Measurement Procedures - Part 3-35: Exams and Measurements - Visual Inspection of Fiber Optic Connectors and Fiber Optic Transceivers*), e assim determinando se o conector está em condições de operação. Na Figura 2.15, encontra-se um trecho de

um relatório de fabricante que utiliza inspeção visual da imagem do polimento do conector baseado na norma acima citada



Results

Zones	Zones Diameter (µm)	Scratches			Defects		
		Criteria (µm)	Thresholds	Count	Criteria (µm)	Thresholds	Count
A: Core	0 - 25	0 ≤ size < ∞	0	0	0 ≤ size < ∞	0	9
B: Cladding	25 - 120	0 ≤ size < 3	Any	0	0 ≤ size < 2	Any	42
		3 ≤ size < ∞	0	0	2 ≤ size < 5	5	65
					5 ≤ size < ∞	0	25
C: Adhesive	120 - 130	---	---	---	---	---	
D: Contact	130 - 250	0 ≤ size < ∞	Any	0	0 ≤ size < 10	Any	215
					10 ≤ size < ∞	0	30

Figura 2.15 - Trecho de relatório de microscópio que identifica a qualidade do polimento do conector de fibra óptica para utilização. Fonte: Arquivo do laboratório LTET-Unifei

Essa norma contempla critérios de inspeção visual observando e classificando detritos, arranhões e defeitos. Para Figura 2.16, em (a) é uma superfície sem a presença de detritos e apta a utilização, em (b), aparentemente igual a (a), porém há uma pequena falha em branco no revestimento, e portanto, não apta, em (c) existe a presença de pequenos detritos típicos e potencializadores de perdas ópticas, por fim, em (d) apresenta-se detritos causados tipicamente pela limpeza equivocada com uso excessivo de algum solvente, como por exemplo o álcool isopropílico.

Sendo assim, também é regulamentado através de norma internacional (IEC/TR62627-01 – *Fibre optic interconnecting devices and passive components – Part 01: Fibre optic connector cleaning methods.*) que detalha métodos de limpeza para conectores de fibra óptica incluindo ferramentas de limpeza típicas assim como seus procedimentos de limpeza. Não obstante, para (Forrest Jr, 2018), existe uma contaminação secundária (cruzada) que são detritos de qualquer tipo fora dos limites da maioria das inspeções existentes e que nem sempre são caracterizados pelos padrões existentes.

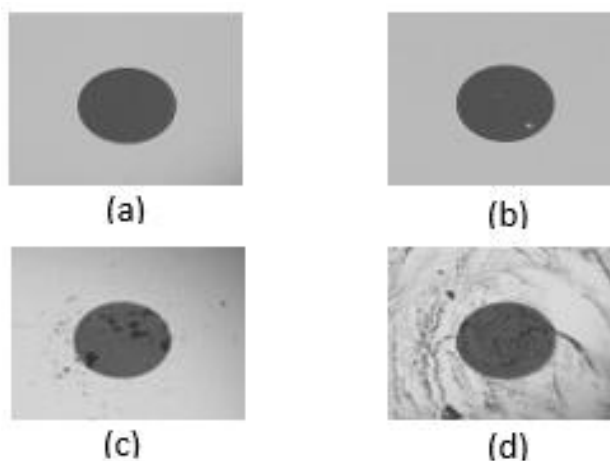


Figura 2.16 - Exemplos de diversas condições da face terminal do conector. Fonte: Arquivo do laboratório LTET-Unifei

Além disso, (Forrest Jr, 2021) questiona a não necessidade de inspeção visual, pois, segundo o seu estudo 90% da primeira limpeza, considerando os piores cenários, utilizando a técnica correta tem um satisfatório resultado para correta limpeza da superfície final da fibra. Essa técnica chamada de “*wet-to-dry*”(molhado para seco) consiste em utilizar uma solvente para eliminar o campo eletrostático que eventualmente fazem acumular detritos, e após eliminar o excesso de solvente para evitar contaminações futuras e retirando por completo todos os elementos causadores de perda de potência óptica. Esse artigo sugere que uma limpeza incorreta pode arranhar a tela devido a abrasividade da poeira assim como a tela de uma TV LCD.

As superfícies da fibra óptica são geralmente adotadas a limpeza a seco com caneta(ferramenta) de limpeza que contém um carretel em que quando apertada junto a superfície do conector uma espécie de linha é passada contra a superfície e eliminando a sujeira existente. Na Figura 2.17 está alguns exemplos dessas canetas de limpeza. Apesar da prática de limpeza atual ser feita a seco com esses dispositivos devido a praticidade e a evitar uma maior contaminação da face final do conector quando feita com o uso de algum solvente, para diversos fabricantes de conectores ópticos baseados na norma IEC/TR62627-01 e em (Requisitos Técnicos e procedimentos de ensaios aplicáveis à certificação de produtos para telecomunicação de categoria III, 2023) são indicados álcool isopropílico.

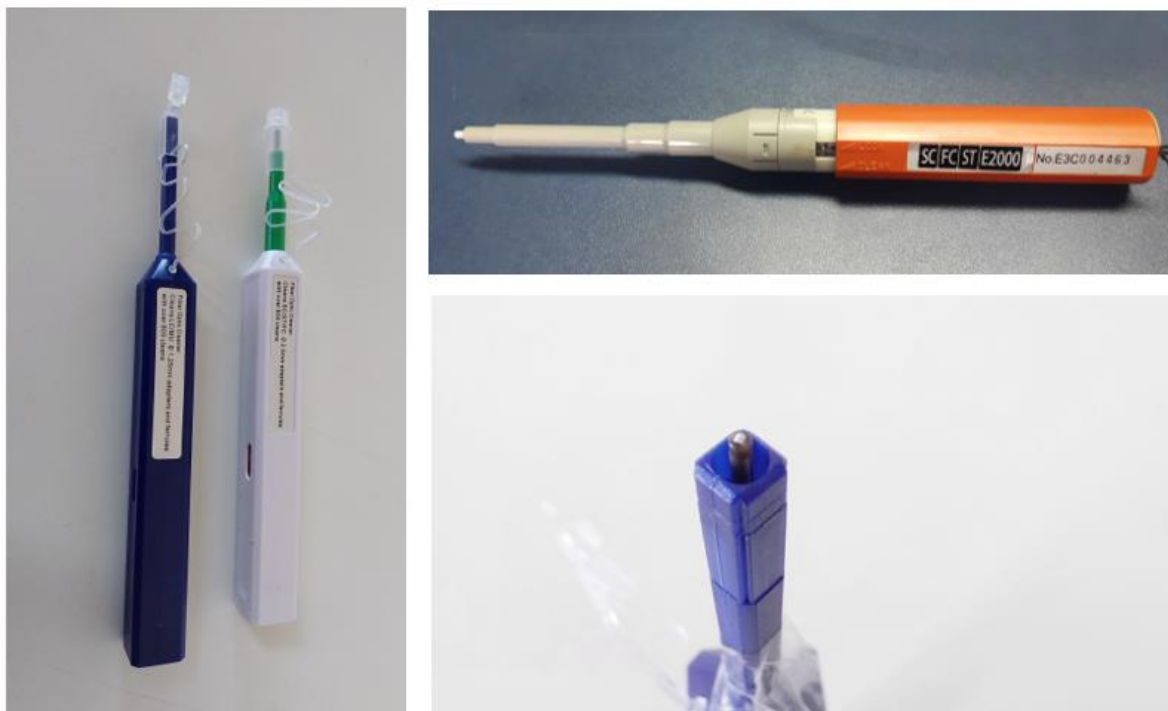


Figura 2.17 - Canetas utilizadas para a limpeza da face terminal do conector. Fonte: Arquivo do laboratório LTET-Unifei.

Além disso, esse requisito indica alguns procedimentos de limpeza dos corpos - de-prova para a correta avaliação do desempenho da conexão utilizando como material de limpeza necessário papel para limpeza de componentes ópticos e álcool isopropílico, sendo eles:

- a) Limpar corretamente ao redor do ferrolho do conector óptico duas vezes com papel umedecido em álcool isopropílico e então, limpar a face do ferrolho transversalmente;
- b) Repetir o passo (a) com um papel seco;
- c) Após a limpeza do ferrolho, evitar o contato óptico com qualquer superfície, antes de sua inserção do adaptador.

Por fim, na Tabela 2 abaixo é mostrada uma relação de valores de sete diferentes conectores do tipo (b) igual mostrado na Figura 3.1,

Tabela 2 - Valores, em reais, de sete conectores montado em campo comercializados no Brasil.

Fabricante	Classe	Categoria	Valor (R\$)
1	I	C	4,00
2	II	C	5,50
3	II	C	4,90 a 5,90
4	II	C	4,50 a 5,50
5	III	D	6,90
6	III	D	6,00 a 6,50
7	III	D	5,90 a 7,00

3 METODOLOGIA

Os conectores ópticos são utilizados nos mais diversos ambientes, como por exemplo, interno ou externamente em ambientes domésticos ou corporativos. Independente do ambiente que os conectores são expostos é esperado que os conectores ópticos apresentem-se baixas perdas ópticas tanto de inserção como de retorno. Além disso, outras características são desejáveis nos conectores, como por exemplo:

- a) fácil instalação e uso;
- b) repetibilidade quando reconectados múltiplas vezes;
- c) compatibilidade com o ambiente;
- d) apresentar resistência a variações de temperatura;
- e) resistência mecânica e durabilidade para que apresente uma vida útil compatível com as diversas aplicações.

Assim sendo, existe a necessidade de testar os conectores ópticos, ou seja, verificar através de alguns ensaios a capacidade do conector de suportar variações mecânicas e climáticas similares as encontradas no uso usual dos dispositivos. Como a variabilidade de ambientes e de propósitos do uso dos conectores ópticos mecânicos é muito extensa, a exigência dos parâmetros adotados nos testes de qualificação dos conectores pode divergir quanto aos parâmetros ideais para a real verificação da qualidade dos conectores.

Diante disso, a metodologia proposta neste trabalho é dividida em três itens. No primeiro item (3.1), descreve-se sumariamente a regulamentação dos ensaios, tanto os requisitos Anatel (ANATEL, 2023) como as normas internacionais da *International Electrotechnical Commission* (IEC). No segundo item (3.2), é discriminado a estrutura física e os equipamentos utilizados para os ensaios. Por fim, no último item (3.3) da metodologia é descrito como foi feito a divisão dos corpos de prova e a amostragem para esse estudo em duas partes. Na primeira parte, propõe-se apresentar uma síntese de resultados obtidos no processo regulamentar de certificação dos conectores ópticos no Brasil, sob requisitos técnicos da ANATEL, adotando-se amostras de dez fabricantes diferentes. Na segunda parte, utiliza-se de uma variação

do tempo previsto de um ensaio climático para fazer considerações quanto a performance do dispositivo em teste.

3.1 REGULAMENTAÇÃO DOS ENSAIOS REALIZADOS

Os ensaios de certificação têm como base o requisito técnico da ANATEL (ANATEL, 2023), que além de estabelecer a quantidade de amostras, divisão de grupos, possibilidades de simplificação de ensaios, métodos de limpeza, condições de montagem e outros, ele norteia cada ensaio com suas principais condições de aplicação. A ANATEL disponibiliza em seu site oficial três listas de requisitos técnicos para produtos de telecomunicações divididas em categorias atualizadas periodicamente e divididas em categorias para diversos produtos de telecomunicações comercializados no país. Concomitantemente, as normas internacionais IEC, publicadas entre 2005 e 2012, estabelecem detalhes mais específicos quanto aos procedimentos de realização dos testes de certificação.

3.1.1 Requisitos Anatel

Os conectores ópticos fazem parte da categoria III e são divididos em três diferentes tipos, como pode ser visto na Figura 3.1. Para todos os tipos, eles devem ser montados em cabos ou cordões previamente certificados pela ANATEL podendo ser cabo óptico compacto ou cabo drop óptico.

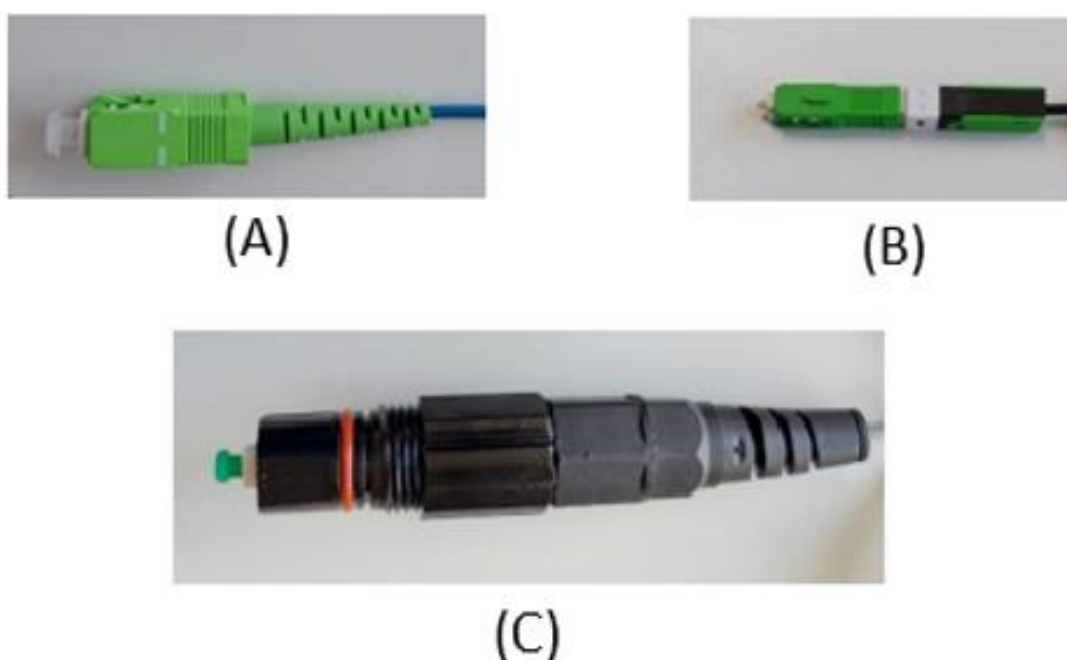


Figura 3.1 - Os três tipos de conector ensaiados. Fonte: Arquivo do LTET-Unifei.

Na Tabela 3 mostra a relação dos testes para os conectores ópticos comercializados no Brasil previstos na última atualização dos requisitos em 19/05/2023. Na primeira coluna da tabela foi dividido em R, S e W, respectivamente, Conector para Fibra Óptica, Conector para Fibra Óptica Montado em Campo para cabos compactos e Conector de Fibra Óptica Reforçado,

Tabela 3 – Relação de testes realizados

	Climáticos	Mecânicos
R	Calor Seco Umidade Ciclo Térmico	Dobramento, Torção, Retenção Axial e Angular, Puxamento Axial, Estabilidade, Impacto, Durabilidade e Vibração.
S	Calor Seco Umidade Ciclo Térmico	Estabilidade, Torção, Impacto, Durabilidade, Vibração
W	Calor Seco Umidade Ciclo Térmico	Dobramento, Torção, Imersão em água, Puxamento axial, Estabilidade, Impacto, Durabilidade, Vibração.

3.1.1.1 Conector para Fibra Óptica

Na execução dos ensaios podem existir um processo de simplificação formando famílias nos ensaios sendo o critério utilizado para o mesmo tipo de conector é apenas variar o tipo de polimento do ferrolho e as cores da carcaça. Ademais, os cordões monomodo podem ser compostos de fibras SM, DS, NZD ou BLI e cordões multimodo com fibras MM 50 ou MM 62,5, em que devem ser fornecidos conectores e adaptadores ópticos em quantidades suficientes para a preparação de 30 corpos-de-prova. O corpo-de-prova é a conexão realizada entre dois conectores através de um adaptador óptico, conforme Figura 3.2. A montagem do corpo-de-prova pode assumir diferentes configurações, no entanto, a conexão sempre deve ser alvo do ensaio realizado tanto para ensaios climáticos como mecânicos.

O conector de fibra óptica será classificado em Classes e Categorias de acordo com o seu desempenho, quanto à perda por inserção e perda por retorno antes e após os ensaios, segundo a (NBR 14433 , 2013). Na Tabela 4 e na Tabela 5 podem ser vistas a relação de desempenho e as classificações inicialmente aplicadas aos conectores para fibra óptica.

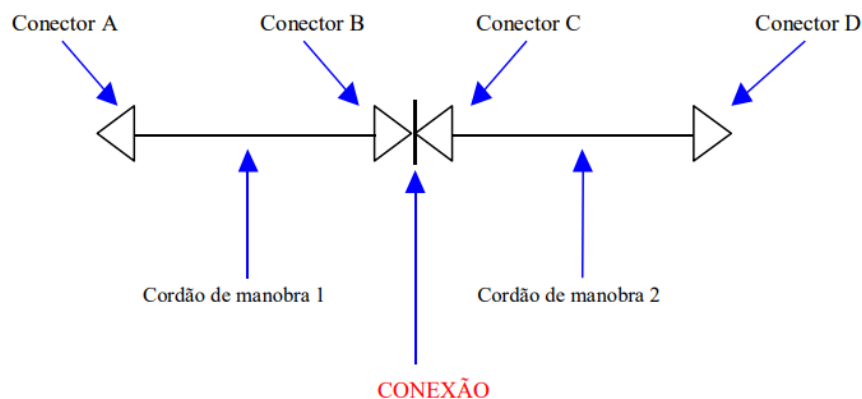


Figura 3.2 - Montagem do corpo-de-prova. Fonte: (ANATEL, 2023)

Assim como para verificação da PI em conectores para fibra monomodo utiliza-se o comprimento de onda de 1550 nm e para fibra multimodo utiliza-se o comprimento de onda de 1300 nm, para PR também são utilizados os mesmos comprimentos de onda, de acordo com (IEC 61300-3-4, 2012) e (IEC 61300-3-6, 2008).

Tabela 4 - Classificação da conexão óptica quanto à perda por inserção.

Perda por Inserção [dB]	Classe I	Classe II	Classe III
Valor médio	$\leq 0,50$	$\leq 0,30$	$\leq 0,15$
Valor máximo	$\leq 0,80$	$\leq 0,50$	$\leq 0,30$

Tabela 5 - Classificação da conexão óptica quanto à perda por retorno.

Perda por Retorno [dB]	Categoria A	Categoria B	Categoria C	Categoria D
Valor mínimo	30	40	50	60

Além das medições iniciais de performance, descritos nas Tabela 4 e Tabela 5, os conectores também são avaliados durante e após os ensaios. Na Tabela 6, é mostrado os valores de PI e PR, durante e após o ensaio, para os ensaios climáticos descritos no item 3.1.1.1.

Tabela 6 - Variação máxima da perda por inserção durante e a perda por retorno após o ensaio.

Varição máxima da perda por inserção [dB]	Classe I		Classe II		Classe III	
		0,30	0,20	0,10		
Perda por retorno mínima [dB]	Categoria A	Categoria B	Categoria C	Categoria D		
	30	40	50	60		

3.1.1.1.1 Requisito Climático – Calor Seco

O ensaio de Calor Seco segue os procedimentos descritos na (IEC 61300-2-18, 2005) e na (IEC 61300-3-3, 2009), e realizado com as condições a seguir:

- a) Pré-condicionamento: 2 h a 25° C;
- b) Condicionamento: +85° C \pm 2° C, durante 96 h;
- c) Recuperação: 2 h a 25° C;
- d) A atenuação deve ser medida, pelo menos, a cada 10 minutos durante o pré-condicionamento e a recuperação, e a cada 60 minutos durante o condicionamento;
- e) A variação da atenuação deve ser calculada comparando cada medida realizada, durante e após o ensaio, com o valor médio obtido durante o pré-condicionamento;
- f) As medidas de Perda por Retorno deverão ser realizadas antes e após o ensaio;
- g) As medições devem ser efetuadas no comprimento de onda de 1550 nm \pm 20 nm;
- h) Não deve ser observado dano físico ou estrutural em qualquer das partes do conector.

3.1.1.1.2 Requisito Climático – Umidade

O ensaio de Umidade segue os procedimentos descritos na (IEC 61300-2-19, 2012) e na (IEC 61300-3-3, 2009), e realizado com as condições a seguir:

- a) Pré-condicionamento: 2 h a 25° C;
- b) Condicionamento:
 - a. Temperatura = +40° C;
 - b. Umidade Relativa (UR) = 93%;
 - c. Duração: 96 h;
- c) Recuperação: 2 h a 25° C;

- d) A atenuação deve ser medida, pelo menos, a cada 10 minutos durante o pré-condicionamento e a recuperação, e a cada 60 minutos durante o condicionamento;
- e) A variação da atenuação deve ser calculada comparando cada medida realizada, durante e após o ensaio, com o valor médio obtido durante o pré-condicionamento;
- f) As medidas de Perda por Retorno deverão ser realizadas antes e após o ensaio;
- g) As medições devem ser efetuadas no comprimento de onda de $1550 \text{ nm} \pm 20 \text{ nm}$.

3.1.1.1.3 Requisito Climático – Ciclo Térmico

O ensaio de Ciclo Térmico segue os procedimentos descritos na (IEC 61300-2-22, 2007) e na (IEC 61300-3-3, 2009) baseados em ciclos de variação de temperatura conforme o gráfico da Figura 3.3, sendo realizado com as condições a seguir:

- a) Pré-condicionamento: 2 h a 25° C ;
- b) Condicionamento:
 - a. Alta temperatura = $+75^\circ \text{ C}$;
 - b. Baixa temperatura = -25° C ;
- c) Número de ciclos: 12;
- d) Recuperação: 2 h a 25° C ;

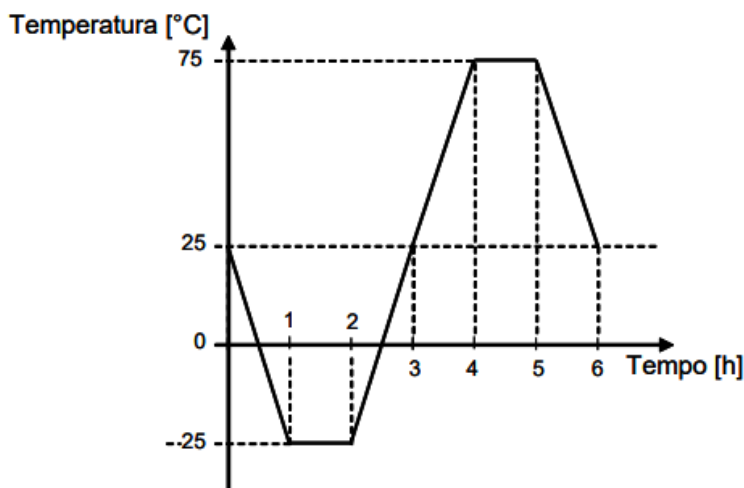


Figura 3.3 - Ciclo de Temperatura. Fonte: (ANATEL, 2023).

- e) A atenuação deve ser medida, pelo menos, a cada 10 minutos;
- f) A variação da atenuação deve ser calculada comparando cada medida realizada, durante e após o ensaio, com o valor médio obtido durante o pré-condicionamento;
- g) As medidas de Perda por Retorno deverão ser realizadas antes e após o ensaio;
- h) As medições devem ser efetuadas no comprimento de onda de $1550 \text{ nm} \pm 20 \text{ nm}$.

Na Tabela 7, são mostrados os valores de PI e PR, durante e após o ensaio, para os ensaios mecânicos descritos nos itens 3.1.1.1.4 - 3.1.1.1.5 - 3.1.1.1.6 - 3.1.1.1.7 - 3.1.1.1.9 - 3.1.1.1.11 e 3.1.1.1.12, no entanto, para os ensaios descritos nos itens 3.1.1.1.8 e 3.1.1.1.10, os valores de PI e PR são os descritos na Tabela 7.

Tabela 7 - Variação máxima da perda por inserção durante e a perda por retorno após o ensaio.

Varição máxima da perda por inserção [dB]		Classe I	Classe II	Classe II
		0,70	0,50	0,30
Perda por retorno mínima [dB]	Categoria A	Categoria B	Categoria C	Categoria D
	30	40	50	60

3.1.1.1.4 Dobramento

O ensaio de Dobramento segue os procedimentos descritos na (IEC 61300-3-3, 2009) e na (ABNT NBR 16119, 2012), e realizado com as condições a seguir:

- a) Força a ser aplicada: 9 N;
- b) Ângulo de dobramento: $- 90^\circ$ a $+ 90^\circ$;
- c) Número de ciclos: 50 ciclos;
- d) A variação da atenuação deve ser calculada comparando as medidas de Perda por Inserção realizadas, antes e após o ensaio, com o dispositivo na posição 0° e sem carga;
- e) As medidas de Perda por Retorno deverão ser realizadas antes e após o ensaio com o dispositivo na posição 0° e sem carga;

- f) As medições devem ser efetuadas no comprimento de onda de $1550 \text{ nm} \pm 20 \text{ nm}$.

3.1.1.1.5 Torção

O ensaio de Torção segue os procedimentos descritos na (IEC 61300-3-3, 2009) e na (IEC 61300-2-5, 2022), e realizado com as condições a seguir:

- a) Força a ser aplicada: 13,5 N;
- b) Número de rotações: 2,5 rotações em torno do eixo da fibra, para cada lado, no mesmo plano;
- c) Número de ciclos: 5 ciclos;
- d) A variação da atenuação deve ser calculada comparando as medidas de Perda por Inserção realizadas, antes e após o ensaio, com o dispositivo na posição 0° e sem carga;
- e) As medidas de Perda por Retorno deverão ser realizadas antes e após o ensaio com o dispositivo na posição 0° e sem carga;
- f) As medições devem ser efetuadas no comprimento de onda de $1550 \text{ nm} \pm 20 \text{ nm}$.

3.1.1.1.6 Retenção Axial

O ensaio de Retenção Axial segue os procedimentos descritos na (IEC 61300-3-3, 2009) e (ABNT NBR 16117, 2012) , e realizado com as condições a seguir:

- a) Força a ser aplicada: 45 N no sentido do eixo do cordão, durante 5 s;
- b) As medidas de Perda por Inserção e Perda por Retorno devem ser realizadas 10 segundos após a retirada da carga;
- c) A variação da atenuação deve ser calculada comparando as medidas de Perda por Inserção realizadas, antes e após o ensaio, com o dispositivo na posição 0° e sem carga;
- d) As medidas de Perda por Retorno deverão ser realizadas antes e após o ensaio com o dispositivo na posição 0° e sem carga;

- e) As medições devem ser efetuadas no comprimento de onda de $1550 \text{ nm} \pm 20 \text{ nm}$.

3.1.1.1.7 Retenção angular

O ensaio de Retenção Angular segue os procedimentos descritos na (IEC 61300-3-3, 2009) e na (ABNT NBR 16116, 2012), e realizado com as condições a seguir:

- a) Força a ser aplicada: 34 N, durante 5 s;
- b) Ângulo de aplicação da força: 90° entre o cordão ou cabo e o conector;
- c) As medidas de Perda por Inserção e Perda por Retorno devem ser realizadas 20 segundos após a retirada da carga, com o dispositivo de ensaio a 90° ;
- d) A variação da atenuação deve ser calculada comparando as medidas de Perda por Inserção realizadas, antes e após o ensaio, com o dispositivo na posição 0° e sem carga;
- e) As medidas de Perda por Retorno deverão ser realizadas antes e após o ensaio com o dispositivo na posição 0° e sem carga;
- f) As medições devem ser efetuadas no comprimento de onda de $1550 \text{ nm} \pm 20 \text{ nm}$.

3.1.1.1.8 Puxamento axial:

O ensaio de Puxamento Axial segue os procedimentos descritos na (IEC 61300-3-3, 2009) e na (ABNT NBR 16115, 2012), e realizado com as condições a seguir:

- a) Força a ser aplicada: 23 N no sentido do eixo do cordão, durante 5 segundos;
- b) As medidas de Perda por Inserção e Perda por Retorno devem ser realizadas 5 segundos após ser aplicada a carga;
- c) A variação da atenuação deve ser calculada comparando as medidas de Perda por Inserção realizadas antes do ensaio com as medidas realizadas após 5 s com o corpo-de-prova dispositivo na posição 0° com carga;
- d) As medidas de Perda por Retorno deverão ser realizadas antes do ensaio e realizadas após 5 segundos com o corpo-de-prova dispositivo na posição 0° com carga;

- e) As medições devem ser efetuadas no comprimento de onda de $1550 \text{ nm} \pm 20 \text{ nm}$.

3.1.1.1.9 Estabilidade

O ensaio de Estabilidade segue os procedimentos descritos na (IEC 61300-3-3, 2009) e na (ABNT NBR 16114, 2012) , e realizado com as condições a seguir:

- Força a ser aplicada: 4,5 N;
- Ângulo de aplicação da força: 90° , 60° , 30° e 0° entre o cordão ou cabo e o conector;
- As medidas de perda por retorno e a perda por inserção devem ser realizadas em cada ângulo de posicionamento
- A variação da atenuação deve ser calculada comparando as medidas de Perda por Inserção realizadas antes, durante e após o ensaio;
- As medições devem ser efetuadas no comprimento de onda de $1550 \text{ nm} \pm 20 \text{ nm}$.

3.1.1.1.10 Impacto

O ensaio de Impacto segue os procedimentos descritos na (IEC 61300-3-3, 2009) e na (ABNT NBR 16113, 2012) , e a Figura 3.4 mostra o esquema do ensaio,

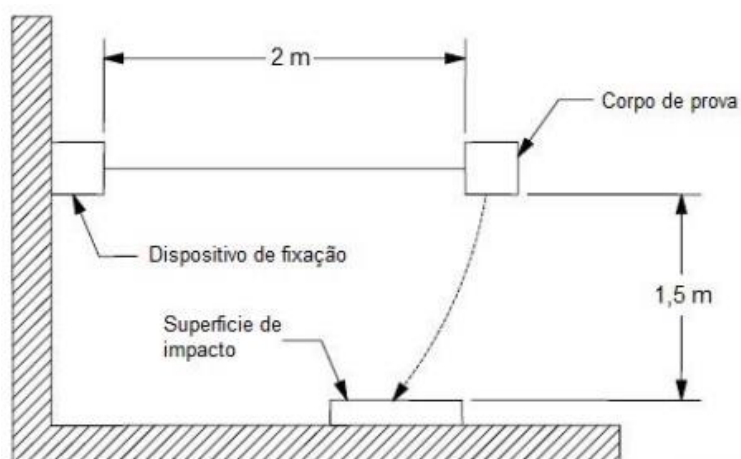


Figura 3.4 - Esquema do ensaio de impacto. Fonte: (ANATEL, 2023).

E de acordo com as condições a seguir:

- Quantidade de impactos: 8;

- b) Altura: 1,5 m;
- c) A variação da atenuação deve ser calculada comparando as medidas de Perda por Inserção realizadas antes e após o ensaio;
- d) As medidas de Perda por Retorno deverão ser realizadas antes e após o ensaio
- e) As medições devem ser efetuadas no comprimento de onda de $1550 \text{ nm} \pm 20 \text{ nm}$.

3.1.1.1.11 Durabilidade

O ensaio de Durabilidade segue os procedimentos descritos na (IEC 61300-3-3, 2009) e na (ABNT NBR 16112, 2012), e realizado com as condições a seguir:

- a) Quantidade de ciclos de reconexões: 100;
- b) Posição dos painéis de corpos-de-prova: a 0,9 m, 1,4 m e 1,8 m acima do chão;
- c) Realizar o procedimento de limpeza nos conectores ópticos antes da caracterização inicial limpando os conectores ópticos de ambos os lados. Durante os ensaios, a cada 25 desconexões apenas o conector C, e a cada 50 desconexões, ambos os lados novamente;
- d) A variação da atenuação deve ser calculada comparando as medidas de Perda por Inserção realizadas antes e após o ensaio;
- e) As medidas de Perda por Retorno deverão ser realizadas antes e após o ensaio;
- f) As medições devem ser efetuadas no comprimento de onda de $1550 \text{ nm} \pm 20 \text{ nm}$.

3.1.1.1.12 Vibração

O ensaio de vibração são realizados no LVA do Instituto de Engenharia Mecânica IEM e seguem os procedimentos descritos na (IEC 61300-3-3, 2009) e na (IEC 61300-2-1, 2009). Os conectores em testes são acoplados em conectores com cabos também certificados através de adaptadores fixados em uma régua apropriada para acomodação deles. Essa régua é fixada no dispositivo a direita da Figura 3.11, em que ocorre os movimentos sinusoidais de vibração. A fixação é feita de maneira a garantir que nem o suporte e nem a régua se desprendem do equipamento, além de

garantir a possibilidade de rotacionar os conectores em três eixos ortogonais entre si. O dispositivo a esquerda da Figura 3.11 é controlador do dispositivo de vibração na qual configura-se os parâmetros exigidos para o ensaio como frequência, amplitude e número de ciclos, por exemplo. Os parâmetros para esse tipo de conector são realizados com as condições a seguir:

- a) Frequência: 10 Hz a 55 Hz;
- b) Duração do ciclo: 10 Hz a 55 Hz retornando a 10 Hz em aproximadamente 1 minutos;
- c) Amplitude: 0,75 mm (1,52 mm pico a pico);
- d) Número de ciclos: 120;
- e) Tempo: 2 h em cada um dos planos mutuamente perpendiculares;
- f) Durante o ensaio a atenuação deve ser medida com intervalos máximos de 10 segundos;
- g) As medidas de Perda por Retorno deverão ser realizadas antes e após o ensaio;

3.1.1.2 Conector para Fibra Óptica Montado em Campo para cabos compactos

Na execução ensaios podem existir um processo de simplificação formando famílias nos ensaios sendo o critério utilizado para o mesmo tipo de conector é apenas variar o tipo de polimento do ferrolho e as cores da carcaça. Ademais, os cordões monomodo podem ser compostos de fibras SM, DS, NZD ou BLI e cordões multimodo com fibras MM 50 ou MM 62,5, em que devem ser fornecidos conectores e adaptadores ópticos em quantidades suficientes para a preparação de 22 corpos-de-prova. Uma vez certificado o conector com um tipo específico de mídia, a extensão da certificação para o uso de cada mídia com tipos e dimensões diferentes devem ser realizados os ensaios Perda por Inserção, Perda por Retorno e Torção de 5 amostras adicionais. O corpo-de-prova é a conexão realizada entre dois conectores através de um adaptador óptico, conforme Figura 3.2. A montagem do corpo-de-prova pode assumir diferentes configurações, no entanto, a conexão sempre deve ser alvo do ensaio realizado tanto para ensaios climáticos como mecânicos.

O conector para fibra óptica montado em campo será classificado em Classes e Categorias de acordo com o seu desempenho, quanto à perda por inserção e perda por retorno antes e após os ensaios, segundo a (NBR 14433 , 2013). Na Tabela 4 e na Tabela 5 podem ser vistas a relação de desempenho e as classificações inicialmente aplicadas aos conectores para fibra óptica Montado em Campo para cabos compactos. Assim como para verificação da PI em conectores para fibra monomodo utiliza-se o comprimento de onda de 1550 nm e para fibra multimodo utiliza-se o comprimento de onda de 1300 nm, para PR também são utilizados os mesmos comprimentos de onda, de acordo com (IEC 61300-3-4, 2012) e (IEC 61300-3-6, 2008).

Além das medições iniciais de performance, descritos na Tabela 3, os conectores também são avaliados durante e após os ensaios. Na Tabela 6, é mostrado os valores de PI e PR, durante e após o ensaio, para os ensaios climáticos descritos no item 3.1.1.2.

3.1.1.2.1 Requisito Climático – Calor Seco

O ensaio de Calor Seco segue os procedimentos descritos na (IEC 61300-2-18, 2005) e na (IEC 61300-3-3, 2009), e realizado com as condições a seguir:

- a) Pré-condicionamento: 2 h a 25° C;
- a) Condicionamento: +85° C \pm 2° C, durante 96 h;
- b) Recuperação: 2 h a 25° C;
- c) A atenuação deve ser medida, pelo menos, a cada 10 minutos durante o pré-condicionamento e a recuperação, e a cada 60 minutos durante o condicionamento;
- d) A variação da atenuação deve ser calculada comparando cada medida realizada, durante e após o ensaio, com o valor médio obtido durante o pré-condicionamento;
- e) As medidas de Perda por Retorno deverão ser realizadas antes e após o ensaio;
- f) As medições devem ser efetuadas no comprimento de onda de 1550 nm \pm 20 nm;

g) Não deve ser observado dano físico ou estrutural em qualquer das partes do conector.

3.1.1.2.2 Requisito Climático – Umidade

O ensaio de Umidade segue os procedimentos descritos na (IEC 61300-2-19, 2012) e na (IEC 61300-3-3, 2009), e realizado com as condições a seguir:

- a) Pré-condicionamento: 2 h a 25° C;
- b) Condicionamento:
 - a. Temperatura = +40° C;
 - b. UR = 93%;
 - c. Duração: 96 h;
- c) Recuperação: 2 h a 25° C;
- d) A atenuação deve ser medida, pelo menos, a cada 10 minutos durante o pré-condicionamento e a recuperação, e a cada 60 minutos durante o condicionamento;
- e) A variação da atenuação deve ser calculada comparando cada medida realizada, durante e após o ensaio, com o valor médio obtido durante o pré-condicionamento;
- f) As medidas de Perda por Retorno deverão ser realizadas antes e após o ensaio;
- g) As medições devem ser efetuadas no comprimento de onda de 1550 nm \pm 20 nm.

3.1.1.2.3 Requisito Climático – Ciclo Térmico

O ensaio de Ciclo Térmico segue os procedimentos descritos na (IEC 61300-2-22, 2007) e na (IEC 61300-3-3, 2009) baseados em ciclos de variação de temperatura conforme o gráfico da Figura 3.5, sendo e realizado com as condições a seguir:

- a) Pré-condicionamento: 2 h a 25° C;
- b) Condicionamento:
 - a. Alta temperatura = +75° C;

- b. Baixa temperatura = -25°C ;
- c) Número de ciclos: 12;
- d) Recuperação: 2 h a 25°C ;
- e) A atenuação deve ser medida, pelo menos, a cada 10 minutos;
- f) A variação da atenuação deve ser calculada comparando cada medida realizada, durante e após o ensaio, com o valor médio obtido durante o pré-condicionamento;
- g) As medidas de Perda por Retorno deverão ser realizadas antes e após o ensaio;
- h) As medições devem ser efetuadas no comprimento de onda de $1550\text{ nm} \pm 20\text{ nm}$.

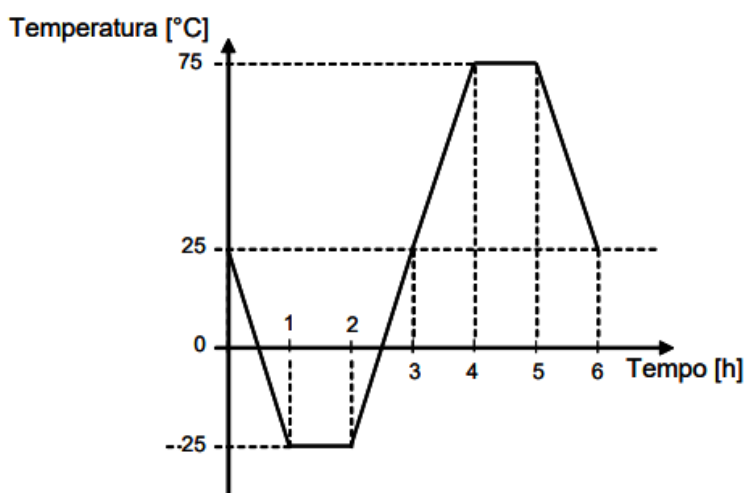


Figura 3.5 - Ciclo de Temperatura. Fonte: (ANATEL, 2023).

Na Tabela 6, são mostrados os valores de PI e PR, durante e após o ensaio, para os ensaios mecânicos descritos nos itens 3.1.1.2.4, 3.1.1.2.5, 3.1.1.2.7 e 3.1.1.2.8, no entanto, para o ensaio descrito no item 3.1.1.2.6, os valores de PI e PR são os constantes na Tabela 7.

3.1.1.2.4 Torção

O ensaio de Torção segue os procedimentos descritos na (IEC 61300-3-3, 2009) e na (IEC 61300-2-5, 2022), e realizado com as condições a seguir:

- a) A distância mínima entre o conector e o dispositivo de fixação do cabo do equipamento deve ser de 40 cm.

- b) Força a ser aplicada: 4,5 N;
- c) Número de rotações: 1 rotação em torno do eixo da fibra, para cada lado, no mesmo plano;
- d) Número de ciclos: 5 ciclos;
- e) A variação da atenuação deve ser calculada comparando as medidas de Perda por Inserção realizadas, antes e após o ensaio, com o dispositivo na posição 0° e sem carga;
- f) As medidas de Perda por Retorno deverão ser realizadas antes e após o ensaio com o dispositivo na posição 0° e sem carga;
- g) As medições devem ser efetuadas no comprimento de onda de 1550 nm \pm 20 nm.

3.1.1.2.5 Estabilidade

O ensaio de Estabilidade segue os procedimentos descritos na (IEC 61300-3-3, 2009) e na (ABNT NBR 16114, 2012) , e realizado com as condições a seguir:

- a) Força a ser aplicada: 4,5 N;
- b) Ângulo de aplicação da força: 90°, 60°, 30° e 0° entre o cordão ou cabo e o conector;
- c) As medidas de perda por retorno e a perda por inserção devem ser realizadas em cada ângulo de posicionamento
- d) A variação da atenuação deve ser calculada comparando as medidas de Perda por Inserção realizadas antes, durante e após o ensaio;
- e) As medições devem ser efetuadas no comprimento de onda de 1550 nm \pm 20 nm.

3.1.1.2.6 Impacto

O ensaio de Impacto segue os procedimentos descritos na (IEC 61300-3-3, 2009) e na (ABNT NBR 16113, 2012) , com o esquema da Figura 3.4 e realizado com as condições a seguir:

- a) Quantidade de impactos: 5;

- b) Altura: 1,5 m;
- c) A variação da atenuação deve ser calculada comparando as medidas de Perda por Inserção realizadas antes e após o ensaio;
- d) As medidas de Perda por Retorno deverão ser realizadas antes e após o ensaio
- e) As medições devem ser efetuadas no comprimento de onda de $1550 \text{ nm} \pm 20 \text{ nm}$.

3.1.1.2.7 Durabilidade

O ensaio de Durabilidade segue os procedimentos descritos na (IEC 61300-3-3, 2009) e na (ABNT NBR 16112, 2012), e realizado com as condições a seguir:

- a) Quantidade de ciclos de reconexões: 50;
- b) Posição dos painéis de corpos-de-prova: a 1,4 m acima do chão;
- c) Realizar o procedimento de limpeza nos conectores ópticos antes da caracterização inicial limpando os conectores ópticos de ambos os lados. Durante os ensaios, a cada 25 desconexões apenas o conector C.
- d) A variação da atenuação deve ser calculada comparando as medidas de Perda por Inserção realizadas antes e após o ensaio;
- e) As medidas de Perda por Retorno deverão ser realizadas antes e após o ensaio;
- f) As medições devem ser efetuadas no comprimento de onda de $1550 \text{ nm} \pm 20 \text{ nm}$.

3.1.1.2.8 Vibração

O ensaio de vibração é realizado no LVA do IEM conforme o item 3.1.1.1.12 com os parâmetros descritos a seguir:

- a) Frequência: 10 Hz a 55 Hz;
- b) Abaixo de 41 Hz, amplitude de 0,75mm;
- c) Acima de 41 Hz, aceleração máxima de 5g.
- d) Número de ciclos: 120;

- e) Tempo: 2 h em cada um dos planos mutuamente perpendiculares;
- f) Durante o ensaio a atenuação deve ser medida com intervalos máximos de 10 segundos;
- g) As medidas de Perda por Retorno deverão ser realizadas antes e após o ensaio;
- h) As medições devem ser efetuadas no comprimento de onda de $1550 \text{ nm} \pm 20 \text{ nm}$.

3.1.1.3 Conector de Fibra Óptica Reforçado

Na execução ensaios podem existir um processo de simplificação, formando-se famílias nos ensaios sendo dois critérios, quanto ao tipo de conector e fibra óptica e quanto ao tipo de cabo. Caso a simplificação for quanto ao tipo de conector e fibra óptica deve ser feitas medições de perda por inserção (PI) e de perda por retorno (PR) em, pelo menos, 10 corpos-de-prova. Por outro lado, se a simplificação for quanto ao tipo de cabo e após realizados todos os ensaios para um dado tipo de conector, inclusive tipo de polimento e tipo de fibra, montado em um determinado tipo de cabo (seção circular ou não circular), realiza-se os ensaios do Grupo III (dobramento, torção e imersão em água), considerando o mesmo tipo de conector.

Ademais, o conector de fibra óptica reforçado é definido como o conjunto composto por um plug conector reforçado, montado em um cabo drop óptico, em que os conectores e adaptadores ópticos reforçados devem ser adequados para aplicações aéreas subterrâneas, e aéreas e subterrâneas.

O corpo-de-prova é definido como sendo uma conexão realizada entre dois conectores: um conector reforçado e um conector convencional, através de um adaptador óptico reforçado, devendo ser fornecidos conectores e adaptadores ópticos em quantidades suficientes para a preparação de 15 corpos-de-prova.

O conector de fibra óptica Reforçado será classificado em Classes e Categorias de acordo com o seu desempenho, quanto à perda por inserção e perda por retorno antes e após os ensaios, segundo a (NBR 14433 , 2013). Na Tabela 8 e na Tabela 5 podem ser vistas a relação de desempenho e as classificações inicialmente aplicadas aos conectores de fibra óptica Reforçado quanto a perda por Inserção e por Retorno, respectivamente.

Tabela 8 - Classificação da conexão óptica quanto à perda por inserção.

Perda por Inserção [dB]	Classe I	Classe II	Classe III
Valor médio	≤ 0,50	≤ 0,30	≤ 0,1
Valor máximo	≤ 0,80	≤ 0,50	≤ 0,30

Assim como para verificação da PI em conectores para fibra monomodo utiliza-se o comprimento de onda de 1550nm e para fibra multimodo utiliza-se o comprimento de onda de 1300nm, para PR também são utilizados os mesmos comprimentos de onda, de acordo com (IEC 61300-3-4, 2012) e (IEC 61300-3-6, 2008).

Além das medições iniciais de performance, descritos nas Tabela 8 e Tabela 5, os conectores também são avaliados durante e após os ensaios. Na Tabela 6, é mostrado os valores de PI e PR, durante e após o ensaio, para os ensaios climáticos descritos no item 3.1.1.3.

3.1.1.3.1 Requisito Climático – Envelhecimento Térmico

O ensaio de Envelhecimento Térmico segue os procedimentos descritos na (IEC 61300-2-18, 2005) e (IEC 61300-3-3, 2009), e realizado com as condições a seguir:

- a) Pré-condicionamento: 2 h a 25° C;
- b) Condicionamento: +85° C ± 2°C, durante 96 h;
- c) Recuperação: 2 h a 25° C;
- d) A atenuação deve ser medida, pelo menos, a cada 10 minutos durante o pré-condicionamento e a recuperação, e a cada 60 minutos durante o condicionamento;
- e) A variação da atenuação deve ser calculada comparando cada medida realizada, durante e após o ensaio, com o valor médio obtido durante o pré-condicionamento;
- f) As medições devem ser efetuadas no comprimento de onda de 1550 nm ± 20 nm;
- g) Não deve ser observado dano físico ou estrutural em qualquer das partes do conector reforçado, incluindo a fibra no ponto de retenção.

3.1.1.3.2 Requisito Climático – Umidade

O ensaio de Umidade segue os procedimentos descritos na (IEC 61300-2-19, 2012) e na (IEC 61300-3-3, 2009), e realizado com as condições a seguir:

- a) Pré-condicionamento: 2 h a 25° C;
- b) Condicionamento:
 - a. Temperatura = +60° C;
 - b. UR = 95%;
 - c. Duração: 168 h;
- c) Recuperação: 2 h a 25° C;
- d) A atenuação deve ser medida, pelo menos, a cada 10 minutos durante o pré-condicionamento e a recuperação, e a cada 60 minutos durante o condicionamento;
- e) A variação da atenuação deve ser calculada comparando cada medida realizada, durante e após o ensaio, com o valor médio obtido durante o pré-condicionamento;
- f) As medições devem ser efetuadas no comprimento de onda de 1550 nm \pm 20 nm.

3.1.1.3.3 Requisito Climático – Ciclo Térmico

O ensaio de Ciclo Térmico segue os procedimentos descritos na (IEC 61300-2-22, 2007) e na (IEC 61300-3-3, 2009) baseados em ciclos de variação de temperatura conforme o gráfico da Figura 3.6, sendo e realizado com as condições a seguir:

- a) Pré-condicionamento: 2 h a 25° C;
- b) Condicionamento:
 - a. Alta temperatura = +75° C;
 - b. Baixa temperatura = -25° C;
- c) Número de ciclos: 28;
- d) Recuperação: 2 h a 25° C;

- e) A atenuação deve ser medida, pelo menos, a cada 10 minutos;
- f) A variação da atenuação deve ser calculada comparando cada medida realizada, durante e após o ensaio, com o valor médio obtido durante o pré-condicionamento;
- g) As medições devem ser efetuadas no comprimento de onda de $1550 \text{ nm} \pm 20 \text{ nm}$.

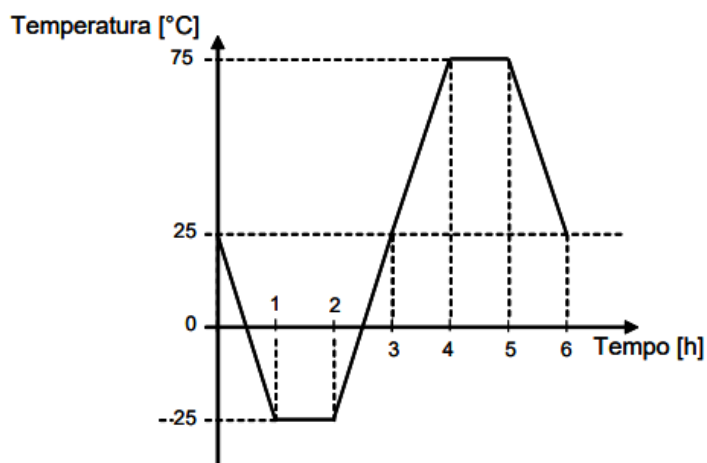


Figura 3.6 - Ciclo de Temperatura. Fonte: (ANATEL, 2023).

Na Tabela 6, são mostrados os valores de PI e PR, durante e após o ensaio, para todos os ensaios mecânicos descritos nos itens 3.1.1.3.4

3.1.1.3.4 Dobramento

O ensaio de Dobramento segue os procedimentos descritos na (IEC 61300-3-3, 2009) e na (ABNT NBR 16119, 2012), e realizado com as condições a seguir:

- a) Força a ser aplicada: 4,5 kgf;
- b) Ponto de aplicação: 0,25 m do final da extremidade do conector;
- c) Ângulo de dobramento: -90° a $+90^\circ$ em relação ao final da extremidade do conector;
- d) Duração do ciclo: aproximadamente 10 segundos;
- e) Número de ciclos: 8 ciclos;
- f) As medições devem ser efetuadas no comprimento de onda de $1550 \text{ nm} \pm 20 \text{ nm}$.

3.1.1.3.5 Torção

O ensaio de Torção segue os procedimentos descritos na (IEC 61300-3-3, 2009) e na (IEC 61300-2-5, 2022), e realizado com as condições a seguir:

- a) Força a ser aplicada: 2,5 kgf;
- b) Ponto de aplicação: 0,25 m do final da extremidade do conector;
- c) Máximo ângulo de torção: $\pm 90^\circ$;
- d) Número de ciclos: 10 ciclos;
- e) A atenuação deve ser medida a cada ciclo na posição 0° ;
- f) As medições devem ser efetuadas no comprimento de onda de $1550 \text{ nm} \pm 20 \text{ nm}$.

3.1.1.3.6 Imersão em Água

O ensaio de Imersão em Água segue os procedimentos descritos na (IEC 61300-3-3, 2009) e na (NBR 14403, 2015), e assim, verificar evidências de entrada de água no seu interior após 7 dias em 3 m de coluna de água. A presença de água fluorescente tingida no interior do adaptador, quando usada uma fonte de luz ultravioleta, deve constituir falha. O ensaio deve ser realizado com as condições a seguir:

- a) O corpo-de-prova deve ser submetido a uma pressão hidrostática de 3 m de coluna d'água, durante 7 dias;
- b) A água a ser utilizada deve ser tingida com fluoresceína sódica, estando a concentração da mistura na faixa de [0,01 % a 0,1 %];
- c) Após 7 dias o corpo-de-prova de ser retirado e cuidadosamente enxugado;
- d) Estando externamente seco, o conector deve ser aberto e examinado internamente com fonte de luz ultravioleta, e verificada a possível contaminação fluorescente, o que revelará a penetração de água.

A Figura 3.7 mostra o esquema do ensaio:

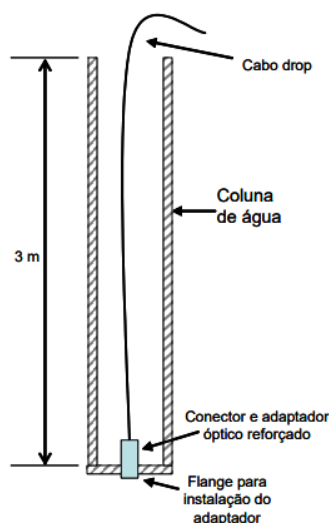


Figura 3.7 - Esquema do dispositivo de imersão. Fonte: (ANATEL, 2023).

3.1.1.3.7 Puxamento axial:

O ensaio de Puxamento Axial segue os procedimentos descritos na (IEC 61300-3-3, 2009) e na (ABNT NBR 16115, 2012) , e realizado com as condições a seguir:

- a) Força a ser aplicada: 90 N no sentido do eixo do cordão, durante 60 segundos;
- b) Ponto de aplicação: 0,25 m do final da extremidade do conector;
- c) A atenuação deve ser medida, pelo menos, cada 10 s;
- d) As medições devem ser efetuadas no comprimento de onda de $1550 \text{ nm} \pm 20 \text{ nm}$.

3.1.1.3.8 Estabilidade

O ensaio de Estabilidade segue os procedimentos descritos na (IEC 61300-3-3, 2009) e na (ABNT NBR 16114, 2012) , e realizado com as condições a seguir:

- a) Força a ser aplicada: 9 N;
- b) Ponto de aplicação: 0,25 m do final da extremidade do conector;
- c) Ângulo de aplicação da força: 90° , 60° , 30° e 0° entre o cabo e o conector;
- d) A atenuação deve ser medida em cada ângulo de posicionamento
- e) As medições devem ser efetuadas no comprimento de onda de $1550 \text{ nm} \pm 20 \text{ nm}$.

3.1.1.3.9 Impacto

O ensaio de Impacto segue os procedimentos descritos na (IEC 61300-3-3, 2009) e na (ABNT NBR 16113, 2012), e realizado com as condições a seguir e de acordo com Figura 3.4:

- a) Quantidade de impactos: 8;
- b) Altura: 1,5 m;
- c) A atenuação deve ser medida antes e após o condicionamento;
- d) As medições devem ser efetuadas no comprimento de onda de $1550 \text{ nm} \pm 20 \text{ nm}$.

3.1.1.3.10 Durabilidade

O ensaio de Durabilidade segue os procedimentos descritos na (IEC 61300-3-3, 2009) e na (ABNT NBR 16112, 2012), e realizado com as condições a seguir:

- a) Quantidade de ciclos de reconexões: 100;
- b) Medir a perda por inserção após o 10º, 20º, 30º, 40º e 50º ciclos. Após cada medição, limpar o conector óptico reforçado de acordo com o procedimento de limpeza especificado pelo fornecedor / fabricante;
- c) As medições devem ser efetuadas no comprimento de onda de $1550 \text{ nm} \pm 20 \text{ nm}$.

3.1.1.3.11 Vibração

O ensaio de vibração é realizado no LVA do IEM conforme o item 3.1.1.1.12 com os parâmetros descritos a seguir:

- a) Frequência: 10 Hz a 55 Hz;
- b) Duração do ciclo: 10 Hz a 55 Hz retornando a 10 Hz em aproximadamente 1 minutos;
- c) Amplitude: 0,76 mm (1,52 mm pico a pico);
- d) Número de ciclos: 360;
- e) Tempo: 2 h em cada um dos planos mutuamente perpendiculares;

- f) Durante o ensaio a atenuação deve ser medida com intervalos máximos de 10 segundos;
- g) As medições devem ser efetuadas no comprimento de onda de 1550 nm \pm 20 nm.

3.1.2 Normas IEC

O item anterior, 3.1.1, em que são descritas as condições de ensaio de cada teste individualmente, e a Tabela 9 mostra a relação de todas as normas IEC, adquiridas para consulta e execução dos procedimentos de ensaios, que descreve com maior detalhamento os procedimentos.

Tabela 9 - Relação das normas IEC utilizadas nos procedimentos de ensaio

IEC 61300	<i>Fibre optic interconnecting devices and passive components – Basic test and measurement procedures</i>
IEC 61300-2-1	Part 2-1: Tests – Vibration (sinusoidal)
IEC 61300-2-4	Part 2-4: Tests – Fibre/cable retention
IEC 61300-2-5	Part 2-5: Tests – Torsion
IEC 61300-2-10	Part 2-10: Tests – Crush resistance
IEC 61300-2-12	Part 2-12: Tests – Impact
IEC 61300-2-18	Part 2-18: Tests – Dry heat – High temperature endurance
IEC 61300-2-19	Part 2-19: Tests – Damp heat (steady state)
IEC 61300-2-22	Part 2-22: Tests – Change of temperature
IEC 61300-2-26	Part 2-26: Tests – Salt mist
IEC 61300-2-37	Part 2-37: Tests – Cable bending for fibre optic closures
IEC 61300-3-1	Part 3-1: Examinations and measurements – Visual examination
IEC 61300-3-3	Part 3-3: Examinations and measurements – Active monitoring of changes in attenuation and return loss
IEC 61300-3-4	Part 3-4: Examinations and measurements – Attenuation
IEC 61300-3-6	Part 3-6: Examinations and measurements – Return loss

3.2 ESTRUTURA FÍSICA E DISPOSITIVOS PARA OS TESTES

A estrutura física, os dispositivos e os equipamentos utilizados nos ensaios estão dispostos no LTET e LVA. Esses laboratórios são localizados no Instituto de Sistemas Elétricos e Energia (ISEE), e no Instituto de Engenharia Mecânica (IMC),

respectivamente, na UNIFEI. Nos itens a seguir são mostrados os equipamentos e dispositivos utilizados nos ensaios juntamente com os testes correspondentes.

Os ensaios climáticos relacionados na Tabela 3 são realizados na câmara climática mostrada na Figura 3.8. Ademais, os ensaios mecânicos também relacionados na mesma tabela são realizados com o auxílio dos dispositivos mostrados na Figura 3.9, a exceção dos ensaios de Imersão em água vibração, em que pode ser visto na Figura 3.10 e Figura 3.11, respectivamente.



Figura 3.8 - Camara Climática Heraeus HC 4033. Fonte: Arquivo do LTET-Unifei.



Figura 3.9 - Dispositivos para a realização dos ensaios mecânicos. Fonte: Arquivo do LTET-Unifei.

O ensaio de imersão em água, descrito no ítem 3.1.1.3.6, é realizado no dispositivo mostrado na Figura 3.10,



Figura 3.10 - Dispositivo para a realização do ensaio imersão em água. Fonte: Arquivo do LTET-Unifei.

O ensaio de vibração, descrito na Tabela 3, é realizado no dispositivo mostrado na Figura 3.11 e nas dependências do LVA,



Figura 3.11 - Dispositivo para a realização do ensaio de vibração, Labworks Inc. SC-121. Fonte: Arquivo do LTET-Unifei.

As medições de PI e PR são feitas com os equipamentos mostrados nas figuras: Figura 3.12, Figura 3.13 e Figura 3.14.



Figura 3.12 - Equipamento de medição de PI e PR, NKLT Modelo SGX 501. Fonte: Arquivo do LTET-Unifei.



Figura 3.13 - Equipamento de Medição de PI e PR, JGR Modelo RL1. Fonte: Arquivo do LTET-Unifei.



Figura 3.14 - Microscópio eletrônico, Santec modelo CS200K-CM. Fonte: Arquivo do LTET-Unifei.

Por fim, outros equipamentos são indispensáveis para os ensaios, como por exemplo na Figura 3.15, a) régua, b) balança digital, c) pesos calibrados e d) cronômetro. Além disso, todos os equipamentos são calibrados por laboratórios pertencentes a Rede Brasileira de Calibração (RBC).

a)



b)



c)



d)



Figura 3.15 - Equipamentos de suporte aos ensaios a) Régua Brasfort, b) pesos calibrados, c) balança digital Filizola 060*852 e d) cronômetro Jaquet analógico. Fonte: Arquivo do LTET-Unifei.

3.3 CORPOS-DE-PROVA E AMOSTRAGEM PARA O ESTUDO

Neste item discute-se como a parte experimental será realizada tendo como resultados apresentado no capítulo 4. A amostragem dos corpos-de-prova foi dividida em dois estudos de rendimento de conectores ópticos, como pode ser visto nos itens subsequentes. No primeiro, realiza-se ensaios completos de certificação de um tipo específico de conectores ópticos (Conector para Fibra Óptica Montado em Campo para cabos compactos) sob o processo normal de certificação no Brasil. No segundo item, investiga-se a performance de conectores quando submetidos a uma variação no tempo de exposição de um ensaio climático.

3.3.1 Estudo 1

A abordagem utilizada foi a escolha aleatória de dez conectores de diferentes fabricantes do tipo S, segundo a Tabela 3, para análise dos resultados. Os corpos-de-prova são divididos em três Grupos (I, II e III). Sendo que, o Grupo I é composto por todas as vinte amostras de cada fabricante, o Grupo II é composto pelas amostras de 1 à 10, e o Grupo III é composto pelas amostras de 11 à 20 do Grupo I, de acordo com a Tabela 10.

Tabela 10 - Ensaio divididos em grupos

Ensaio	Corpos-de-Prova
Grupo I	
Perda por Inserção	Todas as 20 amostras
Perda por Retorno	
Grupo II	
Calor Seco	Amostras da 1° à 10°
Umidade	
Ciclo Térmico	
Grupo III	
Estabilidade	Amostras da 11° à 20°
Torção	
Impacto	
Durabilidade	
Vibração	

Os ensaios são realizados sequencialmente dentro de cada grupo de acordo com o item 3.1.1.2. Com um total de 200 amostras ensaiadas é possível analisar o

comportamento durante a variação de temperatura e umidade, e também sob influências das forças nos ensaios mecânicos quanto a PI e PR.

O conector do tipo S foi escolhido para esse estudo, pois representa aproximadamente 80% dos ensaios de certificação nos anos de 2020 à 2022, segundo o LTET. Apesar de não ser o que apresenta melhor rendimento quando comparado com os do tipo R e W, o conector do tipo S é muito utilizado por provedores de internet na modalidade *Fiber to the Home* (FTTH) devido a praticidade de montagem e instalação. O FTTH é uma solução em que a fibra óptica sai diretamente da central da empresa provedora de internet indo até na residência do cliente. Com isso a utilização desse conector exclui todos os procedimentos industriais e de controle de qualidade de conectores disponíveis em ambientes industriais se tornando por um lado essencial para o dimensionamento do enlace de cada cliente, mas por outro lado perdendo as características qualitativas desejáveis de performance.

Por fim, um entendimento global das características de rendimento dos ensaios, por ora padronizados, permite ter um panorama do comportamento típico dos conectores. Sendo assim, é possível propor novos parâmetros de ensaios que avaliem a qualidade dos conectores de uma maneira mais condizente com as agressões externas sofridas habitualmente e conseqüentemente melhor classifica-los.

3.3.2 Estudo 2

Os parâmetros exigidos e a maneira como são conduzidos os ensaios originam-se de normas internacionais como visto em capítulos anteriores. Além disso, boa parte deles são oriundos de dispositivos de telecomunicações baseados na transmissão de sinal elétricos por condutores metálicos ao invés da luz por compostos de sílica. Diante dos inúmeros ensaios e parâmetros atualmente exigidos no procedimento de certificação, este estudo sugere investigar o comportamento dos conectores quando o tempo de exposição a variação de temperatura é alterado. Dado as diferenças físicas dos meios e a maneira de propagação do sinal, logo, é coerente pesquisar a efetividade das equivalências dos parâmetros adotadas nos ensaios.

Sendo assim, sugere-se a variação do parâmetro tempo no item 3.1.1.2.3 para cinco conectores de distintos fabricantes do tipo S. O ensaio Ciclo Térmico simula a variação de temperatura com temperaturas que vão de -25° C até 75° C em um ciclo de 6 horas, conforme Figura 3.5. No ensaio regulamentar é previsto 12 ciclos, então

utiliza-se a variação para quatro e para 28 ciclos. Com um total de três diferentes tempos totais de exposição ao ciclo térmico para dez amostra de cada fabricante analisa-se o rendimento quanto a PI e PR.

4 RESULTADOS

4.1 ANÁLISE DO ESTUDO 1

Inicialmente, antes da aplicação dos ensaios, realizou-se a medição inicial de PI e PR. As medições foram realizadas para o Grupo I (Estudo 1) de cada conector do tipo S (Tabela 3) de todos os dez fabricantes, dispostas em ordem alfabética de A à J, como pode ser visto no gráfico da Figura 4.1. Sendo assim, a média dos 20 conectores do grupo I estão dispostas no gráfico dessa figura, em que a barra cinza claro representa a PI médio, a barra cinza escura o PI máximo e a linha preta a PR mínimo. Dessas medições iniciais obteve-se um valor médio de PI Inicial de 0,20 [dB], PI Máximo de 0,32 [dB] e PR mínimo de 54,6 [dB].

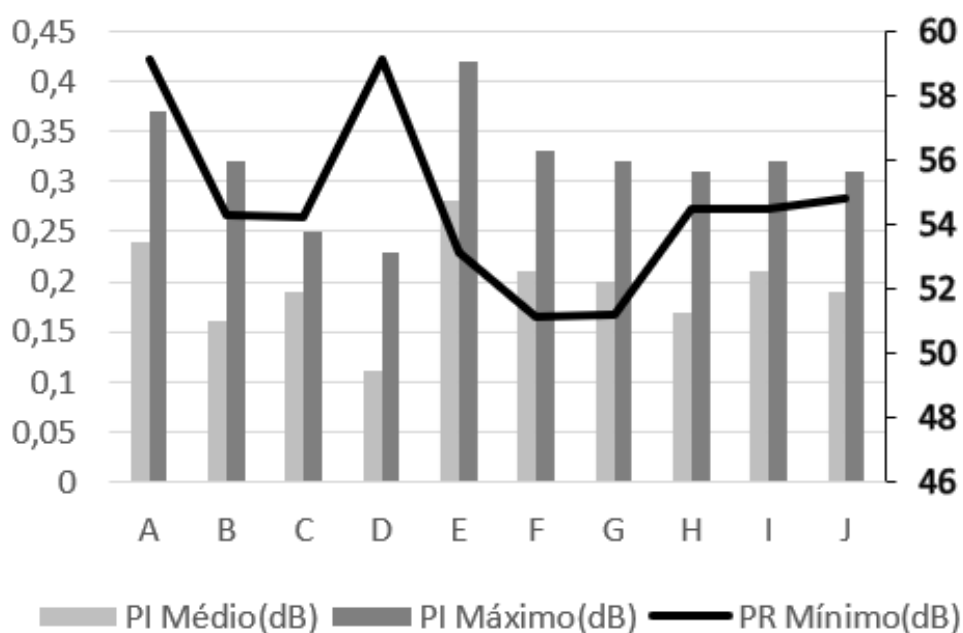


Figura 4.1 - Medições de PI e PR Iniciais

Pode-se notar algumas características, que se destacam nas medições iniciais, quando se analisa cada fabricante individualmente. Uma delas é a repetibilidade das medições iniciais de PI, por exemplo, o fabricante C apresenta um PI médio de 0,19 dB e um PI Máximo médio de 0,25, ou seja, uma diferença de apenas 0,6 dB. Isso demonstra que o produto se mantém mais estável apresentando mais previsibilidade na performance perante as medições iniciais (antes dos ensaios). Outra característica interessante é não existir relação de performance de PI e PR iniciais aparente na maioria dos fabricantes, ou seja, nem sempre um resultado melhor de PI resulta em uma performance de PR também melhor. No entanto, o conector do fabricante D é

uma exceção. Ele apresenta um PR Mínimo de 59,1 dB, no limite superior de mudança de categoria C para categoria D (Tabela 4), além de ser o único fabricante que está na classe III (Tabela 5) com um PI médio de 0,11 dB(inferior a 0,15 dB) e PI Máximo de 0,23 dB(inferior a 0,30 dB).

Após as medições iniciais, utilizou-se os Grupos II e III para os ensaios climáticos e os ensaios mecânicos, respectivamente. A

Tabela 11, mostra o valor da variação máxima de PI e a PR mínima em dB para os dez fabricantes dos conectores ensaiados. Eles foram nomeados de A à J relativos aos ensaios do Grupo II,

Tabela 11 - Resultado da variação máxima de PI e a PR mínima em dB após ensaios do Grupo II

Conectores	Varição Máx. PI [dB]	PR Mínima [dB]
A	0,12	59,3
B	0,13	54,8
C	0,13	56,7
D	0,09	58,6
E	0,16	53,7
F	0,17	51,6
G	0,15	51,8
H	0,17	56,4
I	0,17	54,5
J	0,17	55,5

O gráfico da Figura 4.2 , mostra o resultado dos ensaios do Grupo II. Sendo assim, a média dos 10 conectores do grupo II estão dispostas no gráfico dessa figura, em que a barra cinza claro representa a variação máxima de PI e a linha preta a PR Mínima. Desse modo, obteve-se uma média da variação máxima de PI de 0,15 [dB], e PR mínimo médio de 55,3 [dB].

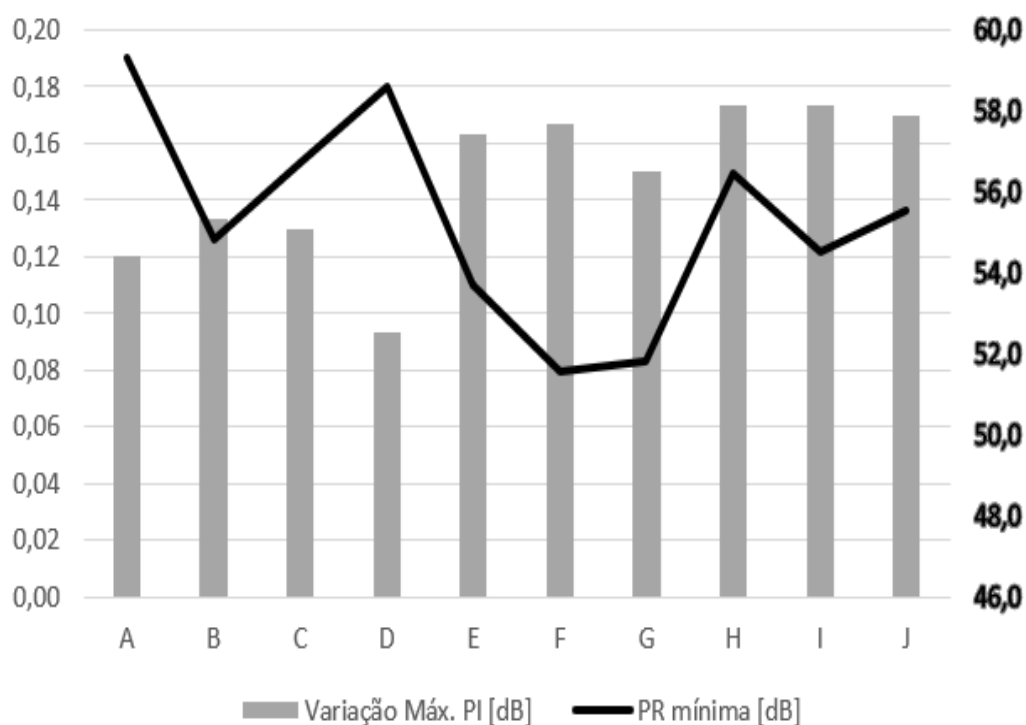


Figura 4.2 - Resultado dos ensaios do Grupo II.

Os valores da variação máxima de PI e a PR mínima em dB para os dez fabricantes conectores nomeados de A à J relativos aos ensaios do Grupo III é mostrado na Tabela 12.

Tabela 12 - Resultado da variação máxima de PI e a PR mínima em dB após ensaios do Grupo III

Conectores	Variação Máx. PI [dB]	PR Mínima [dB]
A	0,12	58,2
B	0,12	55,1
C	0,13	56,4
D	0,09	57,9
E	0,15	53,5
F	0,17	51,6
G	0,17	51,6
H	0,16	55,2
I	0,16	56,7
J	0,15	55,9

O gráfico da Figura 4.3 , mostra o resultado dos ensaios do Grupo III. Sendo assim, a média dos 10 conectores do grupo III estão dispostas no gráfico dessa figura, em que a barra cinza claro representa a variação máxima de PI e a linha preta a PR

Mínima. Desse modo, obtendo-se uma média da variação máxima de PI de 0,14 [dB], e PR mínimo médio de 55,2 [dB].

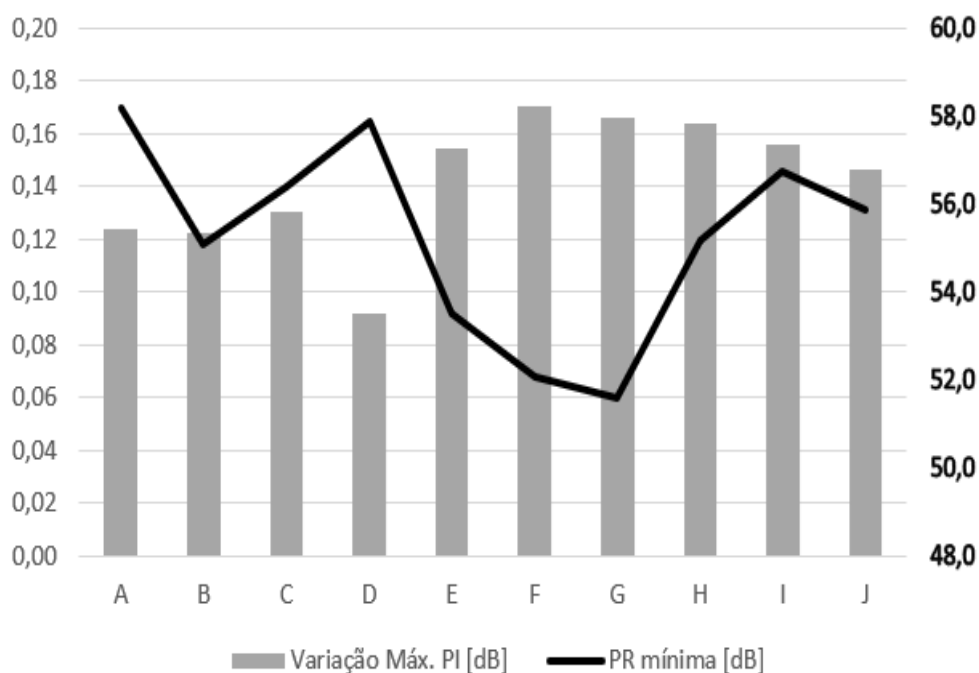


Figura 4.3 - Resultado dos ensaios do Grupo III.

Após a aplicação dos ensaios, notou-se discretas variações nas medições, e um leve aumento na variação máxima de PI nos ensaios do Grupo II (climáticos) do que nos do grupo III (mecânicos) na ordem de 0,01 dB. No entanto, observou-se uma discreta redução média da PR mínima nos ensaios do Grupo III quando comparados com o Grupo II, também na ordem de 0,01 dB. Isso pode indicar que as divisões em grupos bem distintos de testes, climáticos e mecânicos, representam uma correta divisão e avaliação da qualidade dos produtos, pois em nenhum grupo essas variações se destacam, ou seja, a pequena variação encontrada na média representa uma equiparação da agressividade dos parâmetros envolvidos nos testes.

Além disso, observa-se que o desempenho dos conectores, quando comparado os gráficos antes e depois da execução dos ensaios, segue um padrão similar, tanto para o Grupo II como para o Grupo III. Esse fato pode ser observado comparando o gráfico das medições iniciais (Figura 4.1) com os gráficos dos resultados finais (Figura 4.2 e Figura 4.3) devido a proporcionalidade dos valores absolutos das perdas ópticas. Ademais, o gráfico da Figura 4.4 também mostra a manutenção do padrão da curva de PR Mínimo antes dos ensaios (Grupo I) e após os ensaios (Grupo II) e (Grupo III),

e o gráfico da Figura 4.5 também demonstram similaridade no padrão quanto a variação de PI Máxima.

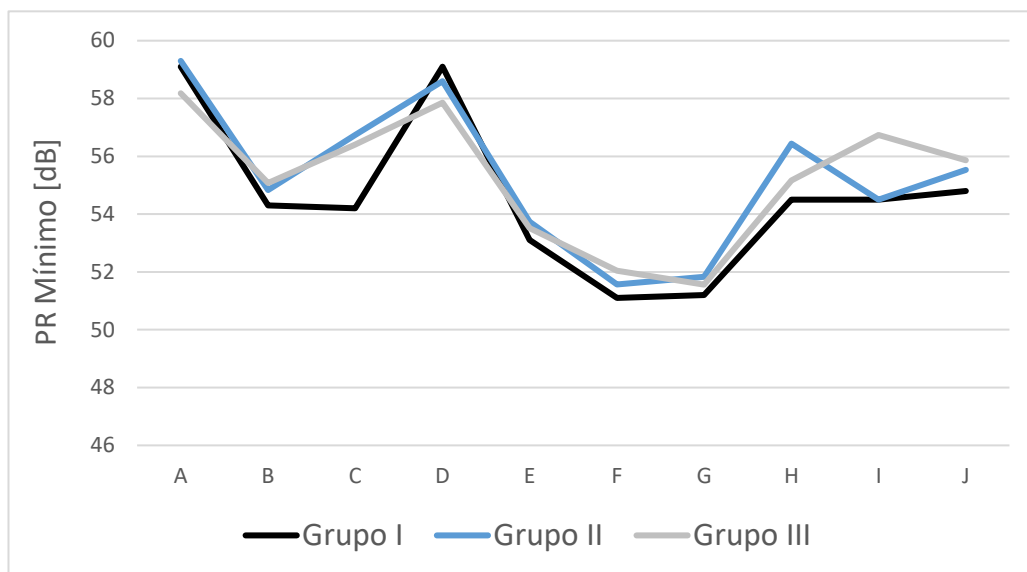


Figura 4.4 - Comparativo da PR Mínima entre os Grupos I, II e III.

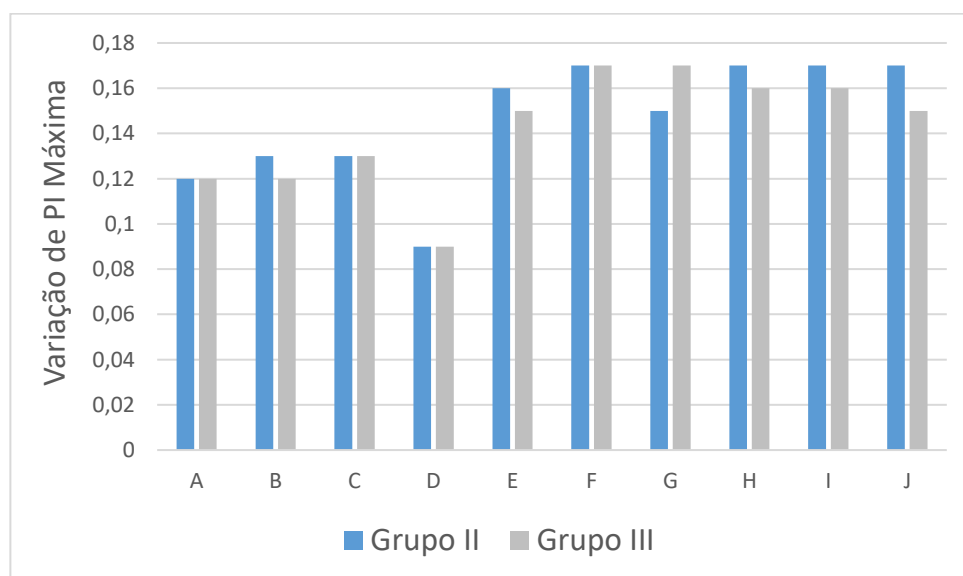


Figura 4.5 - Variação de PI Máxima após ensaios do Grupo II e Grupo III.

Quando aplicado os ensaios do Grupo II e Grupo III, obteve-se uma mesma variação de PI Máxima em 40% dos fabricantes, uma maior variação no grupo II em 50% em relação ao grupo III e uma menor variação do grupo II em 10% em relação ao Grupo III de acordo com o gráfico da Figura 4.5. Esse resultado indica que é bem discreto com uma leve tendência dos ensaios do Grupo II ser mais danoso a performance do conector quanto a variação de PI.

4.2 ANÁLISE DO ESTUDO 2

Os resultados apresentados são referentes a metodologia sugerida no item 3.3.2. Na Tabela 13 estão os valores da variação máxima de PI em [dB] para cinco conectores de fabricantes distintos, nomeados de A à E, relativo aos ensaios de 10 amostras de cada fabricante. Como cada ciclo possui 6 horas de duração de acordo com a Figura 3.5, os conectores são expostos a 1, 3 e 7 dias de exposição as variações térmicas.

Tabela 13 - Resultado da variação de PI média em [dB] após aplicar três diferentes ciclos térmicos.

Conectores	4 Ciclos [dB]	12 Ciclos [dB]	28 Ciclos [dB]
A	0,13	0,14	0,17
B	0,11	0,10	0,15
C	0,08	0,08	0,12
D	0,10	0,09	0,16
E	0,09	0,10	0,14

O gráfico da Figura 4.6, mostra o resultado da variação máxima de PI, obtendo-se a média dos cinco conectores de 0,10 [dB], 0,10 [dB] e 0,15 [dB] quando submetidos a 4, 12 e 28 ciclos térmicos, respectivamente. Nota-se que, para 4 e 12 ciclos, não existe diferença na média da variação máxima de PI, no entanto, para 28 ciclos, a média é maior em 0,05 [dB]. Outra observação relevante é que apenas o conector do fabricante A se mantém na classe II independente da duração dos ciclos de acordo com os valores estabelecidos na Tabela 6, ao contrário dos conectores B, C, D e E. Esses são da classe I e mudam para classe II quando submetidos a 28 ciclos.

Na Tabela 14 estão os valores da PR mínima em [dB] para os cinco conectores nomeados de A à E relativo aos ensaios das 10 amostras de cada fabricante. O gráfico da Figura 4.7 mostram os resultados da PR mínima, obtendo-se uma média dos cinco conectores de A à E de 54,1 [dB], 54,2 [dB] e 52,5 [dB] quando submetidos a 4, 12 e 28 ciclos térmicos, respectivamente. Nota-se que para 4 e 12 ciclos, existe uma diferença de apenas 0,1 dB na média da PR mínima, no entanto, para 28 ciclos, a média é menor em aproximadamente 1,7 [dB]. Além disso, quando se analisa individualmente cada grupo de conectores de um fabricante, verifica-se que essa média ultrapassa 2 [dB], como por exemplo, o conector do fabricante B.

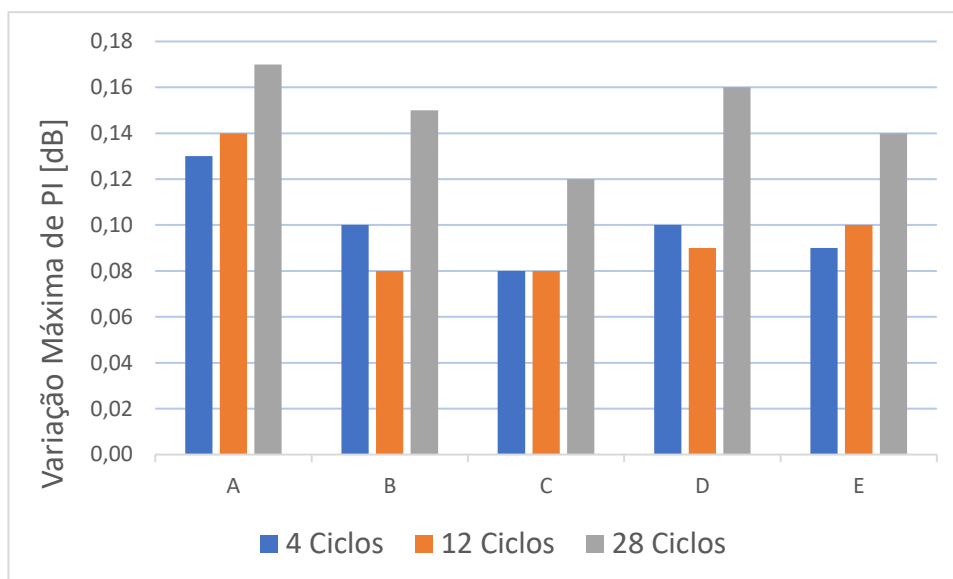


Figura 4.6 - Resultado da Variação Máxima de PI quando submetidos a diferentes ciclos térmicos.

Tabela 14 - Resultado da PR mínima média em [dB] após aplicar três diferentes ciclos térmicos.

Conectores	4 Ciclos [dB]	12 Ciclos [dB]	28 Ciclos [dB]
A	54,6	54,1	52,4
B	53,2	52,8	50,9
C	53,4	53,9	51,8
D	55,5	55,4	54,6
E	53,9	54,8	52,7

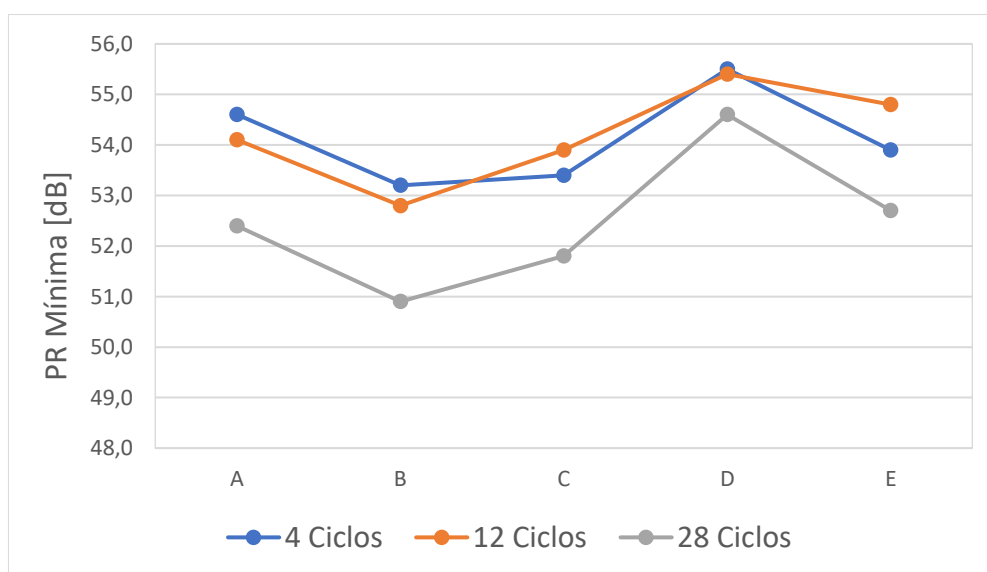


Figura 4.7 - Resultado da PR Mínima quando submetidos a diferentes ciclos térmicos.

Após a aplicação dos ensaios do estudo 2, notou-se uma homogeneidade no desempenho, tanto para PI como para PR, dos conectores para testes com 4 e 12 ciclos climáticos. Entretanto, observou-se uma diminuição considerável no desempenho, em ambos os parâmetros de desempenho analisados, quando aplicados 28 ciclos térmicos. Isso pode ser observado pelos gráficos da Figura 4.6 e Figura 4.7. Apesar dessa variação de desempenho, apenas o parâmetro PI alterou a ponto de mudar a classe do conector em teste, ou seja, mudança de aproximadamente 80% dos conectores da classe I para a classe II, enquanto que para o parâmetro PR todos conectores se mantiveram na categoria C.

5 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Nessa análise foi possível observar alguns dos principais conceitos teóricos da propagação da luz na fibra óptica para transmissão de dados, desde a fonte de luz até os fotodetectores, com ênfase na conectorização mecânica. Além disso, foi englobado todas as exigências normativas para a realização dos ensaios de certificação de conectores de fibra óptica no Brasil norteados pela caracterização de desempenho de PI e PR. Por fim, dois experimentos práticos foram realizados diante de uma amostragem de 200 conectores de dez fabricantes distintos para as considerações regulamentares de ensaio do primeiro experimento e mais 50 amostras de outros cinco fabricantes para testes com variação de exposição aos ciclos térmicos no segundo.

No primeiro estudo, item 3.3.1, observou-se a manutenção da eficiência após os ensaios, podendo ser verificado pelos gráficos da Figura 4.2 e da Figura 4.3 quando comparados com o gráfico em Figura 4.1. Nessa observação, os conectores com medições idealmente melhores de PI e PR, tendem a ter menos variação de PI e manter uma maior média de PR mínimo pela comparação com as medições iniciais das amostras. Outro fato observado foi que após os diversos ensaios realizados, a performance dos conectores, quanto a PR, não foi prejudicada quando comparada com a medição inicial, porque a média do PR mínima foi elevada, ou seja, aproximou dos valores ideais. Uma terceira observação é que a divisão em dois grupos para os ensaios, climáticos e mecânicos, não converge para a diminuição da eficiência dos conectores para ensaio em um grupo específico, pois na mesma maneira que para um grupo apresentam menores alterações de variação de PI, também apresentam menor média de PR mínimo.

No segundo estudo, item 3.3.2, observou-se uma relevante diminuição de eficiência, tanto para PI como para PR, no ciclo térmico com 28 ciclos. No gráfico da Figura 4.6 nota-se uma variação de PI media equivalentes para 4 e 12 ciclos, porém um aumento para 28 ciclos, e no gráfico da Figura 4.7 nota-se uma de PR mínima média equivalentes para 4 e 12 ciclos, porém com uma diminuição considerável para 28 ciclos. Essas alterações para o ciclo térmico de 28 ciclos são suficientes para alterar a classificação do conector pela variação máxima da PI da classe III para classe II, cuja variação máxima passa de 0,1 [dB] para 0,2 [dB], mas não para alterar a categoria do conector que fica acima de 50 [dB] se mantendo na categoria C.

Como existe uma possibilidade de mudança na classificação dos conectores, quando se altera o número de ciclos, existe um eventual impacto no preço de comercialização dos conectores, pois, segundo a Tabela 2, a classificação dos conectores altera o preço unitário do produto. O número de ciclos não influencia os preços somente pelos custos de produção com o material e mão-de-obra, mas também com o custo de certificação do produto, ou seja, o preço cobrado pelos laboratórios credenciados à certificação e a rapidez com que os produtos já estão no mercado gerando receita.

Outra questão que pode ser levantada é qual seria o melhor tempo de exposição as variações térmicas que refletissem a melhor metodologia para testes de certificação, se entre 4 e 12 ciclos, ou o ensaio de 28 ciclos. Se é atualmente adotado 12 ciclos para os ensaios Climáticos, e como não tem alteração significativa para 4 ciclos, existem duas possibilidades de se alterar os testes usuais. A primeira é diminuir para 4 ciclos e considerar como eficaz para o teste, e assim, ganhando tempo de certificação. A segunda é aumentar o tempo de exposição aos testes, para avaliar melhor os conectores, tendo em vista, que houve mudança significativa nos resultados para 28 ciclos.

Por fim, para trabalhos futuros poderiam analisar variações nos parâmetros de outros ensaios regulamentares vigentes, como temperatura, umidade, cargas, repetições e parâmetros dos ciclos do ensaio de vibração, por exemplo. Além dos ensaios que já são realizados, outros equipamentos e tecnologias poderiam auxiliar nos ensaios de certificação, como por exemplo, um espectrômetro, para a verificação de parâmetros dimensionais do conector, da fibra, do polimento, rebaixo e protusão da fibra. Então, o estudo de novas características que alteram a eficiência é válido para melhorar os critérios adotados pelo órgão competente nacional conferindo qualidade para os produtos comercializados no Brasil.

6 REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14433**: Conectores de fibra óptica montados em mídias ópticas e adaptadores. 2. ed. Rio de Janeiro, 2013. 11p. Disponível em: <https://www.gedweb.com.br/aplicacao/usuario/asp/main.asp>. Acesso em: 30 Junho 2023. Acesso exclusivo para o domínio da www.unifei.edu.br.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16112**. Conectores montados em mídias ópticas e adaptadores — determinação da durabilidade. 1. ed. Rio de Janeiro, 2012. 3p. Disponível em: <https://www.gedweb.com.br/aplicacao/usuario/asp/main.asp>. Acesso em: 30 Junho 2023. Acesso exclusivo para o domínio da www.unifei.edu.br.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16113**. Conectores montados em mídias ópticas e adaptadores — determinação do impacto. 1. ed. Rio de Janeiro, 2012. 4p. Disponível em: <https://www.gedweb.com.br/aplicacao/usuario/asp/main.asp>. Acesso em: 30 Junho 2023. Acesso exclusivo para o domínio da www.unifei.edu.br.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16114**. Conectores montados em mídias ópticas e adaptadores — determinação da estabilidade. 1. ed. Rio de Janeiro, 2012. 4p. Disponível em: <https://www.gedweb.com.br/aplicacao/usuario/asp/main.asp>. Acesso em: 30 Junho 2023. Acesso exclusivo para o domínio da www.unifei.edu.br.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16115**. Conectores montados em mídias ópticas e adaptadores — determinação do puxamento axial. 1. ed. Rio de Janeiro, 2012. 4p. Disponível em: <https://www.gedweb.com.br/aplicacao/usuario/asp/main.asp>. Acesso em: 30 Junho 2023. Acesso exclusivo para o domínio da www.unifei.edu.br.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16116**. Conectores montados em mídias ópticas e adaptadores - Retenção angular. 1. ed. Rio de Janeiro, 2012. 4p. Disponível em: <https://www.gedweb.com.br/aplicacao/usuario/asp/main.asp>. Acesso em: 30 Junho 2023. Acesso exclusivo para o domínio da www.unifei.edu.br.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16117**. Conectores montados em mídias ópticas e adaptadores - Retenção axial. 1. ed. Rio de Janeiro, 2012. 4p. Disponível em: <https://www.gedweb.com.br/aplicacao/usuario/asp/main.asp>. Acesso em: 30 Junho 2023. Acesso exclusivo para o domínio da www.unifei.edu.br.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16119**. Conectores Montados em Mídias Ópticas e Adaptadores - Determinação do Dobramento. 1. ed. Rio de Janeiro, 2012. 4p. Disponível em: <https://www.gedweb.com.br/aplicacao/usuario/asp/main.asp>. Acesso em: 30 Junho 2023. Acesso exclusivo para o domínio da www.unifei.edu.br.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14403**. Conjunto de emenda subterrâneo para cabos ópticos — Imersão em água — Método de ensaio. 2. ed. Rio de Janeiro, 2015. 2p. Disponível em: <https://www.gedweb.com.br/aplicacao/usuario/asp/main.asp>. Acesso em: 30 Junho 2023. Acesso exclusivo para o domínio da www.unifei.edu.br.

AL-AZZAWI, A. **Photonics Principles and Practices**. Boca Raton: CRC Press, 2006.

AGÊNCIA NACIONAL DE TELECOMUNICAÇÕES. **Requisitos Técnicos para Certificação**. 2023. Disponível em: <https://www.gov.br/anatel/pt-br/regulado/certificacao/requisitos-tecnicos-para-certificacoes>. Acesso em 24 maio 2023.

ARAKAWA, Y.; YARIV, A. Quantum well lasers – Gain, Spectra, Dynamics. **IEEE J. Quantum Electronics**, v. 22, p. p. 1887-1899, 1986. ISSN 9.

CARTER, L. et al. **Submarine Cables and the Oceans – Connecting the World**. Cambridge: The Lavenham Press, 2009.

CHUANG, S. L. **Physics of Photonic Devices**. New Jersey: WILEY, 2009.

COSTA, A. C. **Notas de aulas sobre características de transmissão em fibras ópticas**. Disponível em: <http://www.paginas.fe.ue.pt>. Acesso em: 06 jun. 2018.

FINISAR. **1310nm Fabry-Perot laser diode pig-tailed package**. Disponível em: <https://www.finisar.com>. Acesso em: 18 jun. 2018.

FORREST JR, E. J. F. Breaking Through Myth to Reality: Future Proof Fiber Optic Inspection and Cleaning. [S.I.]: **Createspace Independent Publishing Platform**, 2018.

FORREST JR, E. J. F. FIBEROPTIC PRECISION CLEANING WITHOUT INSPECTION: HERESY OR A BREAKTHROUGH. **RMS (RaceMarketingServices)**. P.1-3, 2021.

FRENZEL, L. E.. J. **PRINCIPLES OF ELECTRONIC COMMUNICATION SYSTEMS**. New York: McGraw-Hill Education, 2016.

GROUP SACHER LASERTECHNIK, **Distributed feedback (DFB) lasers: narrow linewidth, tunable diode lasers for applications in industry and science**. Sacher Laser, 2018. Disponível em: <https://www.sacher-laser.com>. Acesso em: 20 jun. 2018.

HEISLER, C. **Causes of Return Loss at Mated Single Mode Fiber Optic Connections**. Optotest, 2021. Optotest Your Partner in Fiber Optic Test Solutions. Disponível em: https://santec.imgix.net/Files/White-papers/WP-OP04_Return_Loss.pdf . Acesso em: 09 de 2021.

IBBOTSON, L. **The Fundamentals of Signal Transmission In Line, Waveguide, fibre and free space**. London: Elsevier, 1999.

INTELBRAS. KGS 2110 - **Módulo Mini-GBIC Gigabit Ethernet Mo-nomodo 10 km**. Disponível em: <http://www.intelbras.com.br>. Acesso em: 31 ago. 2018.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. **IEC 61300-3-6**. Fibre optic interconnecting devices and passive components - Basic test and measurement procedures - Part 3-6: Examinations and measurements - Return loss. 3. ed. Geneva, 2008.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. **IEC 61300-2-18**. Fibre optic interconnecting devices and passive components - Basic test and measurement procedures - Part 2-18: Tests - Dry heat - High temperature endurance. 2. ed. Geneva, 2005.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. **IEC 61300-2-22**. Fibre optic interconnecting devices and passive components - Basic test and measurement

procedures - Part 2-22: Tests - Change of temperature. 2. ed. Geneva, 2007.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. **IEC 61300-2-1**. Fibre optic interconnecting devices and passive components - Basic test and measurement procedures - Part 2-1: Tests - Vibration (sinusoidal). 3. ed. Geneva, 2009.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. **IEC 61300-3-3**. Fibre optic interconnecting devices and passive components - Basic test and measurement procedures - Part 3-3: Examinations and measurements - Active monitoring of changes in attenuation and return loss. 3. ed. Geneva, 2009.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. **IEC 61300-2-19**. Fibre optic interconnecting devices and passive components - Basic test and measurement procedures - Part 2-19: Tests - Damp heat (steady state). 3. ed. Geneva, 2012.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. **IEC 61300-3-4**. Fibre optic interconnecting devices and passive components - Basic test and measurement procedures - Part 3-4: Examinations and measurements - Attenuation. 3. ed. Geneva, 2012.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. **IEC 61300-2-5**. Fibre optic interconnecting devices and passive components - Basic test and measurement procedures - Part 2-5: Tests - Torsion. 3. ed. Geneva, 2009.

KEISER, G. **Optical Fiber Communications**. New York: McGraw-Hill, 2008.

KEISER, G. **Optical Fiber Communication**. 4th. ed. New York: McGraw-Hill, 2010.

KUZMANY, H. **Solid-State Spectroscopy An Introduction**. London : Springer, 2009.

LAMBRACHE, N.; PEREIRA, J.; TOROBIN, A. **Refractive index discontinuities in fiber optic**. **JOURNAL OF OPTOELECTRONICS AND ADVANCED MATERIALS**. Ago. 2011. p.1010-1014.

LIU, J.-M. **Photonic Devices**. Cambridge : Cambridge University Press, 2005.

LIZUKA, K. **Elements of Photonics**. New York: Wiley-Interscience, 2002.

LIZUKA, K. **Engineering Optics**. Toronto: Springer, 2008.

MICKELSON, A. R. **Guided Wave Optics**. New York: Springer, 1993.

MILMAN, J.; GRABEL, A. **Microelectronics**. 2 nd. ed. New York: McGraw-Hill, 2009.

MITSUBISHI ELECTRIC. **Optical devices**. Disponível em: <http://www.mitsubishielectric.com>. Acesso em: 11 jun 2018.

NEUMANN, E.-G. **Single-mode Fibers Fundamentals**. New York: Springer, 2013.

OPTOCORE. **Products category**. Disponível em: <http://www.optcore.net>. Acesso em: 31 ago 2018.

PEREIRA, Allann Breno de Sales; FULY, Benedito Isaias Lima; Rodrigues, José Carlos Grilo; NOBUYASU JR, Roberto Shigueru. Analysis of insertion and return loss measurements in mechanical. **International Journal of Development Research**, v. 13, n. 3, p. 61333-61337, jan. 2023.

PERLE. **SFP Optical Transceivers**. Disponível em: <http://www.perle.com>. Acesso em: 31 ago 2018.

PICOQUANT. **Diode Lasers Flexible turn-key solutions for pulsed, switched, and modulated output**. PICOQUANT, 2018. Disponível em: <https://www.picoquant.com>.

Acesso em: 21 jun 2018.

RIBEIRO, J. A.. **Comunicações ópticas**. São Paulo: Editora Ética, 2013.

SATO, K. E. A. Chirp characteristics of 40-gb/s directly Modulated distributed-feedback laser diodes. **IEEE Journal of Lightwave Technology**, v. 23, n. 11, p. 3790-3797, nov. 2005.

Shimizu, N, Tsuchiya, H. Single-mode Fiber Connectors. **Electron**, p. 611-613, 1978.

SMITH, F. G.; KING, T. A.; WILKINS, D. **Optics and Photonics: An Introduction**. Chichester : John Wiley & Sons, 2007.

SNYDER, A. W.; LOVE, J. D. **Optical Waveguide Theory**. Londres: Chapman and Hall, 1983.

SOROKINA, M.; YANKOV, M. P. Information-Theoretic Concepts for Fiber Optic Communications. In: ELLIS, A.; SOROKINA, M. **Optical Communication Systems: Limits and Possibilities**. Singapore: Jenny Stanford Publishing , 2020. p. 165-190.

TANENBAUM, A. S.; WETHERALL, D. J. **Redes de computadores**. 5^a. ed. São Paulo: Pearson, 2011.

WSI. **Long Wavelength Surface Emitting Lasers: In-troduction**. Disponível em: <http://www.wsi.tum.de>. Acesso em: 18 jun. 2018.

ZHOU, X. Loss analysis of physical contact fiber-optic connector induced by the endface geometry and the contact force. **Optical Engineering**, v. 55, n. 4,18 abr. 2016.