



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ  
INSTITUTO DE TECNOLOGIA  
FACULDADE DE ENGENHARIA DA COMPUTAÇÃO E  
TELECOMUNICAÇÕES

# **Estudo de supervisão de redes ópticas WDM-PON usando OTDR via simulação**

Renan Pereira Almeida

BELÉM  
2013

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ  
INSTITUTO DE TECNOLOGIA  
FACULDADE DE ENGENHARIA DA COMPUTAÇÃO E  
TELECOMUNICAÇÕES

Renan Pereira Almeida

# Estudo de supervisão de redes ópticas WDM-PON usando OTDR via simulação

Trabalho de conclusão de curso apresentado na Faculdade de Engenharia da Computação e Telecomunicações da UFPA como requisito para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia da Computação.

Orientador: **João Crisóstomo Weyl A. Costa**  
Co-Orientador: **Vinicius Duarte Lima**

BELÉM  
2013

# Estudo de supervisão de redes ópticas WDM-PON usando OTDR via simulação

Renan Pereira Almeida

PROPOSTA DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO SUBMETIDA À BANCA EXAMINADORA DA FACULDADE DE ENGENHARIA DA COMPUTAÇÃO E TELECOMUNICAÇÕES COMO REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE ENGENHEIRO DA COMPUTAÇÃO.

**Data da defesa:** 26/02/2013

**Conceito:** EXC

BANCA EXAMINADORA:

---

Prof. Dr. João Crisóstomo Weyl Albuquerque Costa  
(Orientador – UFPA)

---

Msc. Vinicius Duarte Lima  
(Co-Orientador – UFPA)

---

Prof. Dr. Marco José de Sousa  
(Membro – UFPA)

---

Prof. Dr. Francisco Carlos Bentes Frey Müller  
(Membro – UFPA)

# Agradecimentos

Primeiramente a Deus por permitir a oportunidade de me graduar neste curso, concretizando um sonho que eu tinha desde a minha infância.

Ao meu orientador João Weyl e as professoras Thereza Rocco e Maria Aparecida, por compartilharem suas experiências com nosso grupo.

Aos meus pais, Reginaldo Almeida e Dilma Braga, e minha avó Maria Ely Almeida, que tanto lutaram para que eu tivesse uma educação de qualidade.

Aos meus “orientadores da vida”: Hebervan Rodrigues, Thiago Cavalcante, Alan Monteiro, Vinicius Lima, Lênon Raiol. Pessoas que participaram diretamente na minha formação pessoal.

À minha namorada e amiga Stela Reis pelo companheirismo, paciência e amor que tem tido durante todo o desenvolvimento deste trabalho.

Ao meu melhor amigo, Rafael da Silva Oliveira, que dividiu comigo as dificuldades, as vitórias e os aprendizados.

Aos meus amigos do Laboratório de Eletromagnetismo Aplicado: Adam Dreyton, Renan Santos, Ulisses Weyl, Nyanne Moritsuka, Cindy Stella, Gustavo Ikeda, Waldeir Monteiro, Daniel Levi, Ramon Villar, Antônio Bessa, Roberto Medeiros, Hibernon Junior, dentre outros.

E aos amigos de graduação: Willian Paixão, Mônica Nelly, João Manoel, Adriano Paranhos, Wellington Souza, Kayo Marlon, Florindo Ayres, dentre outros, que junto comigo compartilharam os aprendizados.

# RESUMO

O objetivo deste trabalho é simular, supervisionar e descrever uma rede óptica passiva que usa multiplexação por divisão de comprimento de onda (WDM-PON). Para se alcançar o objetivo da supervisão, a partir da rede modelada, são reproduzidos cenários que simulam a presença de eventos no enlace em trechos distintos da rede, a fim de serem identificados usando a técnica de reflectometria óptica no domínio do tempo (OTDR). O trabalho é modelado usando o software *VPITransmissionMaker* que dispõe de um ambiente próprio para o desenvolvimento de aplicações em redes ópticas, sensores ópticos, etc. São descritos e estudados detalhadamente todos os blocos da simulação e as fases para construção do modelo, explicitando os parâmetros que regem a rede conforme a teoria. Os resultados alcançados apresentam as curvas de OTDR para cada cenário apresentado. São avaliadas as perdas geradas tanto por componentes da rede quanto pelos eventos inseridos.

**Palavras-chave:** Redes Ópticas Passivas, Monitoramento de Redes Ópticas, Reflectometria Óptica no domínio do tempo, Multiplexação por divisão de comprimento de onda.

# ABSTRACT

The aim of this work is to simulate, monitor and describe a passive optical network that uses wavelength division multiplexing (WDM-PON). To achieve the goal of supervision, scenarios are reproduced that simulate the presence of the loop events in different parts of the network from the first network modeled, in order to be identified using the technique of optical time domain reflectometry (OTDR). This work is modeled using the software *VPITransmissionMaker* that has a proper environment to develop applications in optical networks, optical sensors, etc.. All of the blocks that make the network and simulation steps are described and studied in detail to build the model, explaining the parameters that govern the network according to the theory. The results show the curves of OTDR for each scenario presented. Losses generated by both components of the network as the entered events are evaluated too.

**Keywords:** Passive Optical Network, Optical Layer Monitoring, Optical Time Domain Reflectometry, Wavelength Division Multiplexing.

# Sumário

<b>Lista de Símbolos</b>	<b>x</b>
<b>Lista de Figuras</b>	<b>xi</b>
<b>1 Introdução</b>	<b>1</b>
1.1 Motivação e objetivo . . . . .	1
1.2 Organização do trabalho . . . . .	3
<b>2 Redes ópticas de acesso</b>	<b>5</b>
2.1 Elementos de um enlace óptico . . . . .	5
2.2 Arquiteturas de redes ópticas . . . . .	6
2.3 Redes ópticas passivas . . . . .	7
2.4 Redes WDM-PON . . . . .	8
2.4.1 AWG . . . . .	10
<b>3 Teoria para supervisão de redes ópticas</b>	<b>13</b>
3.1 Monitoramento de camada óptica . . . . .	13
3.2 Propagação de sinal em fibras ópticas . . . . .	15
3.3 Degradação de sinal em fibras ópticas . . . . .	17
3.3.1 Atenuação . . . . .	17
3.3.2 Dispersão . . . . .	19
3.4 OTDR . . . . .	21
3.4.1 Parâmetros OTDR . . . . .	24
3.4.2 Interpretação de curvas OTDR . . . . .	25
<b>4 Modelagem da rede WDM-PON</b>	<b>30</b>
4.1 Software <i>VPI Photonics</i> <sup>TM</sup> . . . . .	30
4.2 Descrição da rede projetada . . . . .	30
4.2.1 Descrição geral . . . . .	30
4.2.2 Blocos de simulação . . . . .	33

<b>5</b>	<b>Análise dos resultados</b>	<b>42</b>
5.1	Cenários propostos . . . . .	42
5.1.1	Cenário sem eventos . . . . .	43
5.1.2	Cenário com perda no 6° km . . . . .	45
5.1.3	Cenário com perda no 27° km . . . . .	45
5.1.4	Cenário com perda no 30° km . . . . .	46
5.1.5	Cenário com perda no 6° e 27° km . . . . .	47
5.1.6	Cenário com perda no 6° e 30° km . . . . .	47
5.1.7	Cenário com perda no 6°, 27° e 30° km . . . . .	48
<b>6</b>	<b>Conclusão</b>	<b>49</b>
6.1	Considerações finais . . . . .	49
6.2	Trabalhos futuros . . . . .	49
	<b>Referências Bibliográficas</b>	<b>50</b>
	<b>Apêndice A: Códigos Matlab para Cossimulação</b>	<b>52</b>



# Glossário

AWG	-	<i>Arrayed Waveguide Grating</i>
BPON	-	<i>Broadband Passive Optical Network</i>
CW	-	<i>Continuous Wave</i>
DR	-	<i>Dinamic Range</i>
DSL	-	<i>Digital Subscriber Line</i>
EPON	-	<i>Ethernet Passive Optical Network</i>
EDFA	-	<i>Erbium-Doped Fiber Amplifier</i>
FPR	-	<i>Free Propagation Range</i>
FSR	-	<i>Free Spectral Range</i>
FTTB	-	<i>Fiber to the Building</i>
FTTC	-	<i>Fiber to the Curb</i>
FTTN	-	<i>Fiber to the Node</i>
FTTP	-	<i>Fiber to the Premises</i>
FTTx	-	<i>Fiber to the “x”</i>
GPON	-	<i>Gigabit Passive Optical Network</i>
HFC	-	<i>Hibrid Fiber Coax</i>
ITU	-	<i>International Telecommunications Union</i>
ITU-T	-	<i>ITU Telecommunications Standardization Sector</i>
MAC	-	<i>Media Access Control</i>
MPLS	-	<i>Multiprotocol label switching</i>
NIU	-	<i>Network Interface Unit</i>
OADM	-	<i>Optical Add Drop Multiplexing</i>
ODN	-	<i>Optical Distribution Network</i>
OFDR	-	<i>Optical Frequency Domain Reflectometry</i>
OLT	-	<i>Optical Line Terminal</i>
ONT	-	<i>Optical Network Terminal</i>
ONU	-	<i>Optical Network User</i>
OTDR	-	<i>Optical Time Domain Reflectometry</i>
OXC	-	<i>Optical Crossconnect</i>
PMD	-	<i>Polarization Mode Dispersion</i>
PON	-	<i>Passive Optical Network</i>
RR-OTDR	-	<i>Reference Reflector OTDR</i>
RS	-	<i>Rayleigh Scattering</i>
TDM	-	<i>Time Division Multiplexing</i>
WDM	-	<i>Wavelength Division Multiplexing</i>

# Lista de Figuras

2.1	Alguns tipos de arquiteturas de redes ópticas. . . . .	7
2.2	Exemplo básico de uma rede PON. . . . .	8
2.3	Conceito básico de uma rede WDM. . . . .	9
2.4	Estrutura de um AWG. . . . .	11
3.1	Luz sendo injetada na fibra. . . . .	15
3.2	Refração da luz. . . . .	16
3.3	Reflexão da luz. . . . .	17
3.4	Efeito do retroespalhamento na transmissão da luz. . . . .	18
3.5	Atenuação em fibra de sílica em função do comprimento de onda. . .	18
3.6	Fatores causadores de perdas na fibra. . . . .	19
3.7	Dispersão Modal na fibra. . . . .	20
3.8	Dispersão Cromática na fibra. . . . .	21
3.9	Dispersão por Modo de Polarização na fibra. . . . .	21
3.10	Diagrama de funcionamento de um equipamento OTDR. . . . .	23
3.11	Curva OTDR para uma fibra sem eventos atenuadores. . . . .	25
3.12	Curva OTDR comum para o fim de uma enlace. . . . .	26
3.13	Curva OTDR para uma quebra na fibra ou enlace aberto. . . . .	26
3.14	Curva OTDR para um conector ou emenda mecânica. . . . .	27
3.15	Curva OTDR para uma emenda de fusão. . . . .	28
3.16	Curva OTDR para uma emenda de fusão com ganho. . . . .	28
3.17	Curva OTDR para uma rachadura ou fenda. . . . .	29
4.1	Modelo ilustrativo da rede. . . . .	31
4.2	Modelo da rede simulada sem eventos. . . . .	32
4.3	Barramento de divisão dos 32 sinais de informação após o AWG. . . .	34
4.4	Bloco de emissão do pulso OTDR . . . . .	34
4.5	Blocos de coleta de dados . . . . .	35
4.6	Barramento de divisão dos 32 sinais de informação após o AWG. . . .	36

4.7	Bloco de demultiplexação . . . . .	37
4.8	Bloco de multiplexação . . . . .	37
4.9	Bloco de enlace com repetidor ( <i>loop</i> ). . . . .	38
4.10	Barramento de passagem do sinal de monitoramento. . . . .	40
4.11	Barramento de divisão dos 32 sinais de informação após o AWG. . . .	40
5.1	Curva OTDR da rede sem perdas por inserção. . . . .	44
5.2	Curva OTDR da rede com perdas por inserção. . . . .	44
5.3	Curva OTDR do Cenário 2. . . . .	45
5.4	Curva OTDR do Cenário 3. . . . .	46
5.5	Curva OTDR do Cenário 4. . . . .	46
5.6	Curva OTDR do Cenário 5. . . . .	47
5.7	Curva OTDR do Cenário 6. . . . .	48
5.8	Curva OTDR do Cenário 7. . . . .	48

# Capítulo 1

## Introdução

### 1.1 Motivação e objetivo

A necessidade de se transmitir informação com menor custo e maior velocidade é uma preocupação recorrente desde a criação das primeiras tecnologias de transmissão. Cada vez mais, o desenvolvimento de tecnologias de rede de acesso têm perseguido este objetivo [1][2]. Atualmente, tais tecnologias podem ser divididas em cabeadas ou não cabeadas. Para as cabeadas, os meios de transmissão variam desde as redes metálicas até a fibra óptica. Dentre as tecnologias baseadas em fibra, a multiplexação por comprimento de onda, ou WDM (do inglês, *Wavelength Division Multiplexing*), tem provado ser uma técnica muito eficiente para aumentar a largura de banda em redes ópticas. Pelo acoplamento de vários comprimentos de onda em uma única fibra óptica, é possível multiplicar a capacidade dos canais, e além disso, com a tecnologia de amplificação óptica disponível, é possível também sobrepor o problema da limitação no alcance destas redes, satisfazendo as exigências dos sistemas de transmissão de longa distância [3].

Conhecendo este cenário, sabe-se que o crescente aumento do volume de dados trafegado em uma única via torna o canal físico cada vez mais importante. Por consequência, seu monitoramento e proteção se torna imprescindível uma vez que sua queda acarretaria na interrupção do acesso a banda larga de milhares de usuários. Dessa maneira, foram pensadas diversas técnicas de supervisão, detecção e identificação de falhas em redes com o objetivo de evitar a perda de qualidade no serviço ou até mesmo deixá-lo indisponível [2][4][5].

Diversos trabalhos vêm sendo desenvolvidos nos últimos anos a fim de monitorar o comportamento de redes ópticas de acesso. O uso de reflectometria óptica no domínio do tempo, OTDR (do inglês *Optical Time Domain Reflectometry*) tem sido bastante frequente para tal objetivo, e aperfeiçoamentos tem sido feitos também na

reflectometria óptica no domínio da frequência, o OFDR (do inglês *Optical Frequency Domain Reflectometry*), de forma a melhorar a caracterização de parâmetros e explorar aspectos diferenciados da rede. Em [6], [7] e [8], um único cenário é usado para analisar aspectos de uma rede óptica usando OTDR. O OTDR também é usado em [9] para descrever características para projetos de instalação, teste, manutenção e monitoramento de fibras ópticas. Em [10] e [11] modificações são feitas a partir do OTDR a fim de se obter diferentes parâmetros para uma melhor caracterização da rede.

Uma curva OTDR pode ser amplificada por intermédio de um bombeamento de Raman co-propagante a fim de se obter uma melhor caracterização da fibra, como é proposto no trabalho [6]. Neste experimento, o sinal de dados e o bombeamento percorrem em um enlace de 10 km, e partir dessa amplificação, obteve-se uma melhora de 16 dB na curva obtida do reflectômetro. Isto foi possível graças ao aumento no alcance dinâmico proporcionado pelo bombeamento, melhorando a identificação de eventos no enlace. O resultado foi provado experimentalmente através da comparação da curva OTDR *com* e *sem* a amplificação de Raman. Devido a amplificação conseguiu-se um aumento da relação sinal-ruído, tornando detectável a presença de eventos que outrora não eram identificados na fibra.

Em [7], um experimento similar é realizado no mesmo cenário usado em [6]. Porém aqui, o objetivo é determinar o efeito da amplificação de Raman em um cenário com a presença de derivações. Dessa maneira, foi verificado o efeito da amplificação em cada uma das ramificações desta rede. O OTDR também é usado para tal. Os resultados obtidos são coerentes com a evolução do ganho prevista segundo a literatura conhecida. Tais medições são úteis para determinar o comprimento e bombeamento adequado aplicado para se obter um ganho global.

Em [8], é descrita uma nova técnica de reflectometria para caracterização de sistemas WDM. Este método tem como base um OTDR sintonizável, buscando caracterizar e avaliar os efeitos não-lineares nestes sistemas. Este método tem por objetivo possibilitar o estudo de interações entre os efeitos não lineares, especificamente a Mistura de Quatro-Ondas e o Espalhamento de Raman Estimulado, e também verificar como estes efeitos estão distribuídos ao longo da fibra. A partir da técnica desenvolvida, foi possível prever o impacto das não linearidades da fibra para uma rede WDM.

Os trabalhos apresentados anteriormente demonstram a aplicabilidade da utilização de técnicas de reflectometria especialmente baseadas em OTDR para monitoramento de redes ópticas. A implementação de cenários é fundamental, entretanto o custo associado leva à necessidade do uso de simulações para validação e projeto de cenários. Neste campo softwares comerciais são bastante utilizados dentre eles destacam-se o *VPITransmissionMaker* [12] e o *OptSystem* [13].

Este trabalho tem por objetivo propiciar um cenário de uma rede WDM-PON que permita a análise de perdas em fibras ópticas através do uso de OTDR. Para tal, foi utilizado o software de simulação *VPITransmissionMaker* por dispor de um ambiente próprio para o desenvolvimento de aplicações em redes ópticas, sendo amplamente utilizado em centros de pesquisa, como se pode verificar em trabalhos como [2], [14] e [15]. Além disso, é realizado um estudo de cada componente presentes na rede e são descritos seus parâmetros com objetivo de possibilitar a reprodução do cenário por terceiros. Para verificar a validade dos resultados obtidos da reflectometria são inseridos eventos em pontos distintos do enlace, gerando no total sete cenários a partir da mesma rede.

## 1.2 Organização do trabalho

Na sequência, o trabalho é organizado da seguinte maneira:

- No Capítulo 2 são explorados os principais conceitos de redes ópticas que se inserem no contexto da simulação da rede que se pretende modelar. É tratado sobre os componentes presentes em um enlace óptico, as principais arquiteturas de redes ópticas e as características de uma rede óptica passiva.
- No Capítulo 3 é apresentada a teoria envolvida na supervisão de redes WDM-PON, sendo dada uma breve introdução na teoria de propagação de luz em fibras. São expostos os principais fatores de perdas em redes ópticas e os fatores que limitam a capacidade de transmissão da fibra. Além disso, é explicado também sobre o funcionamento do OTDR e os principais eventos que são detectados por este equipamento.
- No Capítulo 4 é descrita a modelagem da rede óptica utilizada neste trabalho usando o software *VPITransmissionMaker*. São descritos detalhadamente os parâmetros necessários para configuração da rede modelada e os blocos que a compõe.

- No Capítulo 5 são apresentados os cenários construídos a partir da rede que foi descrita e os resultados obtidos da execução do modelo. Tendo posse da curva OTDR ou reflectograma é feita a avaliação das perdas na rede juntamente com os eventos introduzidos.
- No Capítulo 6 são feitas as considerações finais acerca dos resultados alcançados. Além disso, são exploradas as aplicações futuras que podem ser desenvolvidas a partir deste trabalho.

# Capítulo 2

## Redes ópticas de acesso

### 2.1 Elementos de um enlace óptico

A função de um enlace de fibra óptica é transmitir um sinal proveniente de um dispositivo eletrônico emissor até um local de outro dispositivo receptor. Os elementos que compõem um enlace óptico são [3]:

- *Transmissor*: Consiste em uma fonte de luz associada a um dispositivo eletrônico. A fonte pode ser um LED ou um LASER. É feito uso da eletrônica para controlar a estabilidade de saída da luz, e a variação do sinal óptico proporcionalmente ao sinal de informação modulado eletricamente.
- *Fibra Óptica*: É o elemento responsável por propagar o sinal de luz. A fibra óptica é utilizada dentro de um cabo que fornece isolamento de influências do ambiente e proteção mecânica. Existe uma variedade de tipos de fibras óptica e diferentes configurações de cabeamento dependendo do meio em que a fibra é instalada.
- *Receptor*: Dentro de um receptor há um fotodiodo que detecta o sinal óptico proveniente de uma fibra e converte este sinal para o domínio elétrico. O receptor também contém elementos amplificadores e de restauração do sinal.
- *Dispositivos Passivos*: São dispositivos que não requerem controle eletrônico para seu funcionamento. Entre estes estão conectores ópticos, emendas, isoladores ópticos, filtros ópticos e acopladores.
- *Amplificadores Ópticos*: Após o sinal percorrer certa extensão da fibra parte da potência deste é perdida. Em certo nível de potência mínimo, este sinal deve ser amplificado para que seu nível de potência se eleve, tendo em vista não perder a informação contida no sinal. Tradicionalmente o sinal é convertido



para o domínio elétrico, amplificado eletricamente e então convertido para o domínio óptico novamente. Entretanto existem outras formas utilizadas para amplificar o sinal sem intervenção eletrônica, tais como bombeamento de Raman e amplificadores de fibra dopada (EDFA, do inglês *Erbium-Doped Fiber Amplifier*).

- *Componentes Ativos*: lasers e parte dos amplificadores ópticos incluem-se nessa categoria, pois requerem controle eletrônico para seu funcionamento. Estes componentes incluem moduladores de sinal, filtros ópticos ajustáveis, uma variedade de atenuadores ópticos e divisores ópticos ou *switches*.

## 2.2 Arquiteturas de redes ópticas

No contexto da próxima geração de redes ópticas de acesso, duas principais arquiteturas são consideradas: acesso híbrido fibra-coaxial ou HFC (do inglês *Hybrid Fiber Coax*) e acesso fibra até o armário de distribuição ou FTTC (do inglês *Fiber To The Curb*). Ao contrário do HFC, nas arquiteturas com prefixo “FTT” a informação é transmitida digitalmente pelo enlace vindo da central até as unidades da rede óptica ou ONU (*Optical Network Units*). Especificamente no caso das FTTC, após o armário de distribuição outras tecnologias são utilizadas para levar o sinal até o usuário, como por exemplo xDSL<sup>1</sup>. A expectativa é que a fibra chegue cada vez mais perto do assinante com estas arquiteturas [16].

Comumente, a nomenclatura usada para descrever arquiteturas de redes ópticas baseia-se no termo FTTx, proveniente do inglês *Fiber-to-the-x*, ou seja, tendo como referência a central, é descrito o caminho da fibra até a terminação da rede, sendo o “x” o destino final da fibra [17]. Dependendo de quão perto estas arquiteturas chegam próximas ao usuário provêm as diversas nomenclaturas. Para um cenário onde a fibra chega até a casa de cada usuário é dada à arquitetura o nome FTTH (do inglês *Fiber To The Home*). Para o caso de uma central servir a uma quantidade maior de usuários, como um edifício por exemplo, a arquitetura aplicada é a FTTB (do inglês *Fiber To The Building*). Tipicamente, na FTTC, a fibra se encontra a cerca de 100 metros do usuário. No acesso FTTCab (do inglês *Fiber To The Cabinet*) a fibra é levada até um gabinete em uma vizinhança com aproximadamente 1 quilômetro até o usuário final [16]. Na Figura 2.1 [1] são apresentadas algumas das arquiteturas citadas.

---

<sup>1</sup>Família de tecnologias de Linha Digital de Assinante ou DSL (*Digital Subscriber Line*).

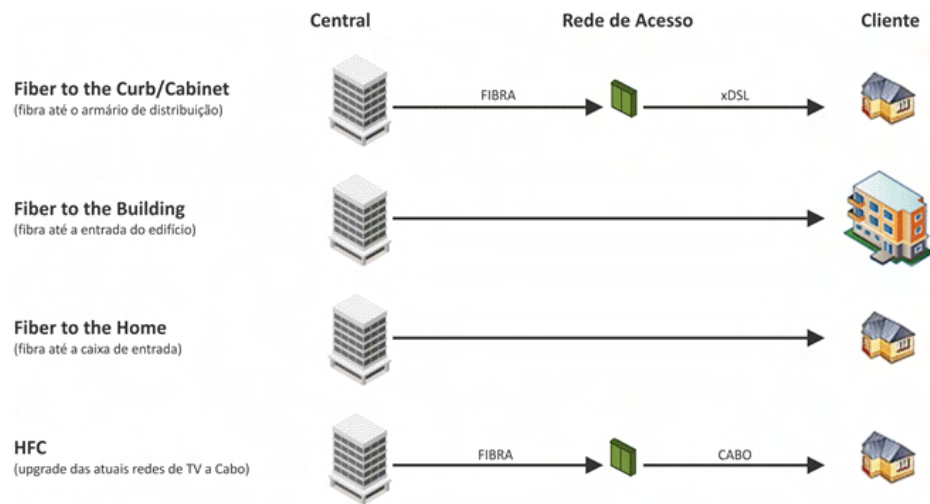


Figura 2.1: Alguns tipos de arquiteturas de redes ópticas.

## 2.3 Redes ópticas passivas

Uma rede óptica passiva, ou PON (do inglês *Passive Optical Network*), consiste basicamente de um terminal de enlace óptico (OLT, do inglês *Optical Line Terminal*), uma rede de distribuição óptica (ODN, do inglês *Optical Distribution Network*) e uma determinada quantidade de ONUs.

A OLT fica localizada na central telefônica (CO, do inglês *Central Office*) e contém os elementos emissores e receptores da rede, sendo responsável por transmitir dados aos usuários e receber informações passadas por estes. O ODN, também conhecido como nó remoto, é o ponto que interliga as OLTs com as ONUs, nele estão presentes os divisores (*splitters*) e/ou combinadores que definirão quantas ONUs a OLT pode suportar. A Figura 2.2 ilustra um exemplo de uma rede PON com 32 ONUs. Dependendo da complexidade da rede, nas ODN também podem ser utilizados multiplexadores ópticos que adicionam ou retiram um sinal da rede, chamados OADM (do inglês *Optical Add Drop Division Multiplexing*), e conectores ópticos de cruzamentos, também conhecidos como OXC (do inglês *Optical Crossconnect*), interconectados via enlace óptico [16].

Devido uma rede PON ser baseada em uma arquitetura ponto-a-ponto, o enlace que provém da OLT para o ODN é compartilhado para todas ONUs, tornando o custo por usuário relativamente baixo.

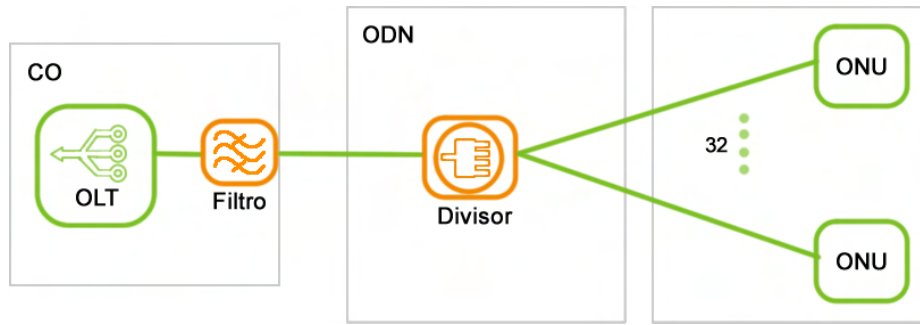


Figura 2.2: Exemplo básico de uma rede PON.

Na rede PON, um OLT representa uma terminação em um enlace ponto-a-ponto que faz a multiplexação de múltiplos comprimentos de onda dentro de uma única fibra, e também demultiplexa uma composição de sinais em comprimentos de onda individuais. Três elementos funcionais encontram-se dentro de um OLT: *transponders*, multiplexadores de comprimento de onda e amplificadores ópticos. Dentre estes, o *transponder* é responsável por adaptar um sinal que chega de um usuário para um sinal apropriado para o uso dentro da rede óptica. Da mesma forma, ele também adapta o sinal proveniente da rede para um sinal apropriado ao cliente [16].

Com o rápido desenvolvimento das tecnologias PON, outros tipos de tecnologias surgiram a partir desta. Dentre os tipos de PON existentes, os três principais são: PON de banda larga ou BPON (do inglês *Broadband PON*), *Ethernet PON* ou EPON, e a *Gigabit PON* ou GPON [18]. Atualmente, GPON e EPON se tornaram as tecnologias PON com a maior quantidade de usuários, sendo a EPON mais presente na Ásia, particularmente Japão e Coreia do Sul, enquanto GPON é tem maior quantidade de usuários na Europa e América do Norte [2].

## 2.4 Redes WDM-PON

Antes de falar de WDM-PON, é interessante abordar o conceito de redes que utilizam multiplexação por divisão de tempo (TDM, do inglês *Time Division Multiplexing*). No TDM-PON, um mesmo sinal emitido pela OLT é emitido via broadcast a diferentes ONUs através de um divisor óptico de potência passivo. Sendo que sinais de diferentes ONUs são multiplexados no domínio do tempo [19].

Nas redes WDM-PON, diferentemente do que ocorre em TDM, faz-se uso de acopladores passivos WDM para dividir o sinal proveniente da OLT. Os sinais que chegam a diferentes ONUs são diferenciados por seu comprimento de onda, roteado pelo próprio acoplador a uma ONU específica. Nesse sentido, o AWG (do inglês

*Arrayed Waveguide Grating*) é um elemento importante em redes WDM-PON. Em um acoplador WDM comum, um sinal é dividido a um número  $N$  de usuários. Com a inserção do AWG, um número  $M$  de entradas pode ser dividido a  $N$  saídas, sendo  $M \leq N$ . Além disso, o AWG possibilita que em uma mesma fibra trafeguem diferentes tipos de dados, desde que cada um use um respectivo comprimento de onda, possibilitando assim uma ampliação considerável na capacidade de transmissão através da fibra óptica [19] [3].

O princípio da tecnologia WDM consiste no uso de múltiplas fontes operando em comprimentos de onda igualmente espaçados para transmitir informações independentes simultaneamente na mesma fibra [20]. Na Figura 2.3 [20] é ilustrado o conceito básico de uma rede WDM, desta maneira diversos comprimentos de onda  $\lambda_x$ , onde  $x = 1, 2, 3 \dots n$ , são emitidos dos transmissores (TX) até os receptores (RX). Além disso pode-se verificar a presença de multiplexadores e demultiplexadores de comprimento de onda, amplificadores, transmissores e receptores.

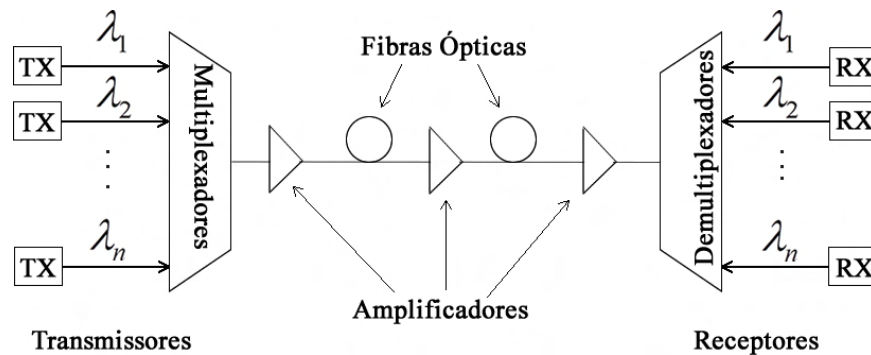


Figura 2.3: Conceito básico de uma rede WDM.

O uso de WDM em redes PON é uma solução promissora para a melhora na capacidade de transmissão por fibra óptica. Ela provê maiores larguras de banda, mais segurança e uma baixa perda por inserção [2].

A tecnologia WDM vem sendo amplamente desenvolvida por grande parte das empresas de telecomunicações, principalmente para comunicação ponto-a-ponto devido seu custo-benefício que permite o uso de mais fibras. A capacidade de roteamento do WDM é capaz de realizar o chamado MPLS (do inglês *multiprotocol label switching*), que provê circuitos virtuais para suporte de tráfego ponto-a-ponto [16], e também o roteamento de pacotes ópticos, possibilitando maior eficiência e economia em redes baseadas em IP. A comparação do WDM com TDM é uma questão relevante na hora da instalação da rede, entretanto a instalação de um TDM ou WDM é basicamente determinada por questões econômicas (tais como custo de manutenção e menor

número de componentes) e harmonização com as redes existentes [21].

A combinação da tecnologia WDM com a taxa de transmissão de 100 Gbit/s por canal óptico permitirá atingir, em curto prazo, a velocidade de 8 Tbit/s por fibra [22]. Em [23], são tratados os principais fatores da evolução da base do acesso óptico de TDM para WDM. É falado sobre a questão do WDM ser considerado a solução ideal para o aumentar a capacidade das redes ópticas sem alterar drasticamente a estrutura de fibra já desenvolvida. Sendo assim, esta tecnologia capaz de fornecer um enlace virtual ponto-a-ponto para o usuário final em uma PON sem complicar os protocolos de controle de acesso de mídia (MAC, do inglês *media access control*), o qual simplifica as tarefas de gerenciamento da rede, proteção e segurança. Além disso, são justificadas as vantagens da evolução da rede TDM para WDM, utilizando para isso os parâmetros de capacidade, custo e facilidade de manutenção da rede.

### 2.4.1 AWG

O AWG é baseado em um princípio da óptica que diz que ondas de luz com diferentes comprimentos de onda não interferem linearmente uns nos outros. Isto significa que, se cada um dos canais da rede faz uso de um comprimento de onda ligeiramente diferente, a luz desses canais podem ser transmitida por uma única fibra óptica com um *crosstalk* desprezível entre os canais [24]. Na Figura 2.4 [24] é vista a estrutura desse componente. Nota-se que o AWG consiste de um número de portas acopladas de entrada (1) e de saída (5), faixas de propagação livre (FPR, do inglês *Free Propagation Range*) em (2) e (4), e grades de guia de onda (3). A luz é multiplexada no guia de onda de entrada (1), atravessa o espaço de propagação livre (2) e entra em guias de onda de canal (3), nesses guias de onda as fibras possuem diferentes comprimentos com espaçamento  $\Delta L$  entre si, de forma a aplicar um deslocamento de fase diferente na saída de cada fibra. Após isso, cada comprimento de onda passa por outro FPR (4) para então ser direcionado para seu respectivo canal de saída (5) demultiplexado [24][25]. O espaçamento  $\Delta L$  é conforme a equação

$$\Delta L = \frac{m\lambda_0}{n_{eff}}, \quad (2.1)$$

onde  $m$  é um número inteiro que representa o canal,  $\lambda_0$  é o comprimento de onda do canal central e  $n_{eff}$  é o índice de refração efetivo [26].

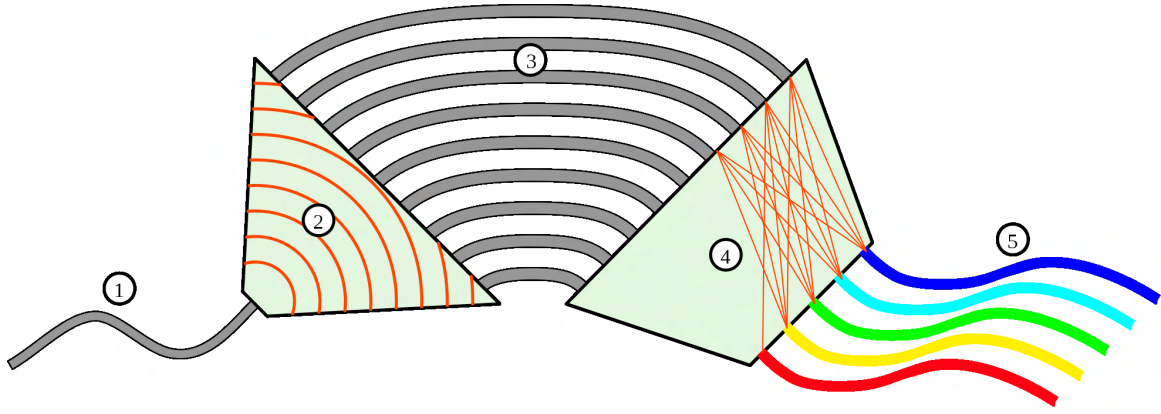


Figura 2.4: Estrutura de um AWG.

Um AWG fornece um roteamento fixo de um sinal óptico de uma porta de entrada para uma porta de saída baseado no comprimento de onda do sinal. Comparado com o acoplador passivo estrela, no qual um dado comprimento de onda só pode ser usado em uma porta de entrada, o AWG pode possuir  $N$  portas de entradas e  $N$  portas de saídas, sendo capaz de rotear um máximo de  $N^2$  conexões. Por ser um dispositivo integrado, o AWG pode ser facilmente projetado com um baixo custo. Entretanto a desvantagem deste é o fato de ter uma matriz de roteamento fixa, não permitindo ser reconfigurado [16].

Adentrando na estrutura do AWG, este nada mais é que um roteador de comprimento de onda não reconfigurável constituído de dois acopladores passivos estrela com  $N$  portas de entrada e  $N'$  portas de saída, e uma grade de guia de onda. As entradas do primeiro acoplador são separadas por uma distância angular  $\alpha$  (espaçamento de canal de entrada) e suas saídas são separadas por uma distância  $\alpha'$  (espaçamento de canal de saída) [16][27]. É importante ressaltar que este componente é fixo, isto é, após definidos os número de portas e as respectivas rotas, não é possível modificar o mesmo, daí ele ser não reconfigurável.

De conhecimento dos termos apresentados no paragrafo anterior, temos que a regra de roteamento do AWG de uma porta  $N$  para uma porta  $N'$ , segundo [27], é dada por

$$f_{N,N'} = f_0 + (N' - 1).\alpha' - (N - 1).\alpha + B.\Delta f_{FSR}, \quad (2.2)$$

onde  $B$  é o parâmetro *colorless* e  $\Delta f_{FSR}$  é o espaçamento da faixa espectral livre (FSR, do inglês *Free Spectral Range*). O parâmetro *colorless* faz menção a um AWG cíclico ou não cíclico. Se *não cíclico*, isto significa que um único canal de entrada pode ser roteado de uma porta de entrada para qualquer porta de saída. Se *cíclico* assume-se que múltiplos canais cujas frequências centrais estão espaçadas por um

$\Delta f_{FSR}$ , operam em uma faixa de frequência  $[f_{min}, f_{max}]$  e podem ser roteados em portas de entrada e saída específicas [27].

A FSR é uma importante propriedade do AWG, conhecida também por demultiplexador de periodicidade [28]. Ela interfere diretamente no número máximo de entradas/saídas de canais do AWG, sendo dada pelo número inteiro do quociente  $FSR/\Delta L$  [28]. Sendo assim, dado que  $n_g$  é o índice de refração de grupo e  $n_c$  é o índice de refração da onda guiada, a FSR é dada por [28]

$$FSR = \frac{\lambda_0 n_c}{m n_g}. \quad (2.3)$$

## Capítulo 3

# Teoria para supervisão de redes ópticas de acesso

### 3.1 Monitoramento de camada óptica

As empresas fornecedoras de acesso banda larga têm buscado formas simples e eficazes de monitorar a via de acesso que interliga central e usuário. De preferência as formas de monitoramento devem acontecer a partir da central fornecedora do serviço, através da interpretação automática (sem intervenção humana) de dados medidos a ponto de evitar o envio de técnicos a campo ou a casa de usuários. A fim de assegurar que os serviços providos por redes ópticas de acesso alcancem seus destinatários, um sistema de monitoramento deve ser configurado para agir periodicamente, ou por demanda, com o intuito de automatizar a identificação de falhas na rede.

Por definição, uma tecnologia de monitoramento deve ter a capacidade de detectar faltas e prover ao sistema de gerenciamento da rede informações úteis para propósito de análise. Tais informações devem ser determinantes para permitir que seja feito um rápido reparo na rede quando necessário, aumentando a confiabilidade e reduzindo maiores custos operacionais [4].

A mais importante questão para o monitoramento em redes PON é o custo. Portanto, mesmo uma tecnologia que propicie uma visibilidade completa da infraestrutura óptica para o operador, esta pode não ser de interesse para aplicações em redes PON. Consequentemente, as tecnologias de monitoramento requerem um projeto simples de fabricação e implementação a fim de minimizar o custo [29][4].



As tecnologias de monitoramento devem possuir as seguintes características: flexibilidade, simplicidade, transparência e confiabilidade. Flexíveis a fim de permitir o melhoramento e adaptabilidade à rede. Simplicidade ao fazer monitoramento, lembrando que esta característica interfere diretamente no custo. Transparência em relação à transmissão de dados, ou seja, não deve interferir em nenhum aspecto da rede. E por último, em mérito de manutenção e proteção, a confiabilidade é primordial, isto é, ter total segurança da durabilidade dos componentes inseridos na rede [4].

Boa parte dos mecanismos de monitoramento para redes PON existentes são baseados em reflectometria. Técnicas que utilizam OTDR são estudadas a fim de se obter uma melhor caracterização da rede, assegurando a integridade do enlace. O monitoramento baseado em OTDR fornece um monitoramento automático e caracteriza todo o enlace, entretanto é ineficiente para redes PON ponto-multiponto, isto é, redes com ramificações [29]. Isto ocorre devido o sinal retroespalhado em uma PON ser parcialmente ou totalmente mascarado pelos sinais dos outros ramos. Para PONs, a potência total medida por um OTDR é a soma de todas as potências vindas dos diferentes ramos em uma rede [4].

A fim de reduzir a complexidade da análise de um OTDR em uma PON, uma variedade de soluções foram propostas para caracterizar ramos individuais. Dentre as soluções de OTDR encontram-se técnicas como: refletores de referência (RR-OTDR), acesso por múltiplos comprimentos de onda e soluções eletrônicas embarcadas na ONU. O acesso por múltiplos comprimentos de onda, que é aplicado neste trabalho, reduz o problema de múltiplos ramos em uma PON para um problema de caracterização ponto-a-ponto. Para isto, é necessário isolar o sinal de monitoramento do sinal de dados. Esta solução fornece um monitoramento centralizado e possibilita que o sistema de gerenciamento da rede possa tanto detectar quanto localizar falhas [4].

### 3.2 Propagação de sinal em fibras ópticas

Uma fibra óptica consiste basicamente de um núcleo cilíndrico envolvido por uma blindagem ou casca. Cada camada possui um índice de refração, este índice é a relação entre velocidade da luz no vácuo e a velocidade da luz no meio, dada conforme [30]

$$n = \frac{C}{V}, \quad (3.1)$$

onde  $n$  é o índice de refração,  $C$  é a velocidade da luz no vácuo e  $V$  é a velocidade da luz no meio.

Dado que um raio de luz é incidido na região do núcleo da fibra óptica com um ângulo  $\alpha_0$ . A máxima capacidade de aceitação da fibra de receber a luz que adentra o núcleo é dada por um parâmetro chamado abertura numérica, ou AN. A abertura numérica é o fator determinante para a capacidade da fibra de acoplar uma quantidade maior de comprimentos de onda, isto é, abranger uma maior faixa de frequência [3]. Em uma fibra de índice degrau este parâmetro é dado pela expressão

$$AN = \text{sen}(\alpha_0) = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}, \quad (3.2)$$

onde  $n_1$  e  $n_2$ , são respectivamente o índice de refração do núcleo e da casca da fibra, e  $\alpha_0$  é o ângulo de aceitação da fibra, sendo  $2\alpha_0$  o ângulo total de aceitação, conforme ilustra a Figura 3.1 [17].

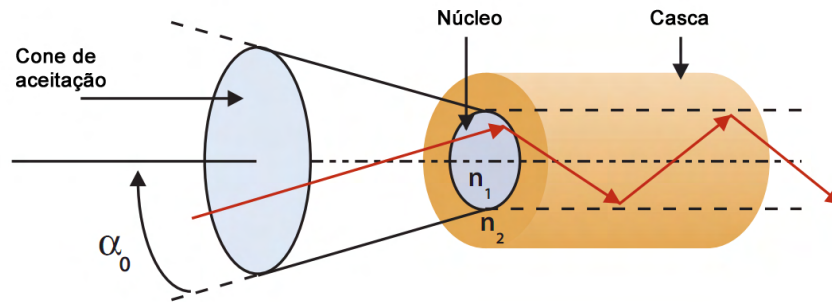


Figura 3.1: Luz sendo injetada na fibra.

Naturalmente este índice deve ser o maior possível, haja vista o intuito de acoplar o máximo de luz dentro da fibra. Contudo, fibras com abertura numérica muito grande podem ser prejudiciais ao propósito de comunicação devido ao fenômeno conhecido como dispersão modal. Resumidamente, a dispersão modal é um fenômeno que ocorre quando diferentes raios percorrem caminhos com diferentes comprimentos na fibra, como resultado ocorre a dispersão destes raios no tempo [25].

Ao incidir na interface ar-fibra a luz sofre efeito da refração. Obedecendo a lei de Snell [31]

$$n_1 \sin(\alpha_1) = n_2 \sin(\alpha_2), \quad (3.3)$$

onde  $n_1$  e  $n_2$  são os índices de refração no meio “1” e do meio “2”, e  $\alpha_1$  e  $\alpha_2$  são o ângulo incidente e o ângulo refratado respectivamente. Este efeito trata da mudança do ângulo de propagação quando há a passagem da luz por meios com diferentes índices de refração. Se um ângulo  $\alpha$  é maior que  $\alpha_0$ , então o raio incidente é totalmente refratado, não sendo absorvido pelo núcleo, como mostra a Figura 3.2 [17].

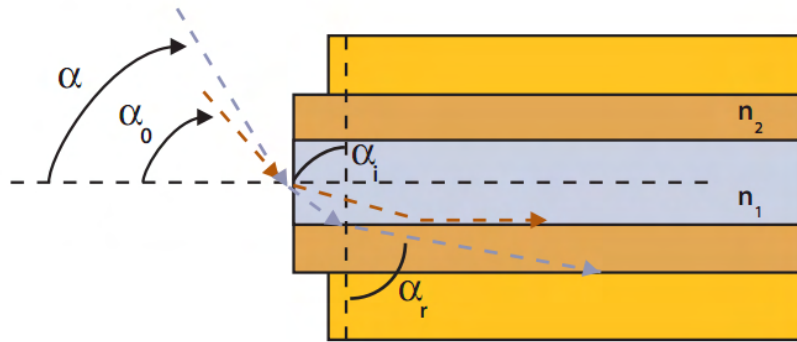


Figura 3.2: Refração da luz.

Para um determinado ângulo de incidência é possível constatar o fenômeno de reflexão total da luz. Através dele é possível fazer com que a luz sofra múltiplas reflexões no núcleo da fibra, possibilitando que esta se propague. Para isso, é necessário que o índice de refração do núcleo seja maior que o da casca e que o ângulo de incidência  $\alpha$  seja menor que o ângulo crítico  $\alpha_0$ , de forma que

$$\sin(\alpha_0) < \frac{n_2}{n_1}. \quad (3.4)$$

Uma vez que tais reflexões ocorram no comprimento da fibra, todos os raios com ângulo menor que  $\alpha_0$  permanecem confinados no núcleo da fibra [25], conforme ilustra a Figura 3.3 [17].

Raios de luz entram na fibra com diferentes ângulos e não seguem o mesmo caminho. Um raio que adentra o núcleo da fibra com um ângulo muito baixo percorrerá um caminho menor que um raio com maior ângulo de incidência. Cada caminho é resultante de um dado ângulo de incidência e um dado ponto de entrada na fibra, resultando em diferentes modos de propagação [17].

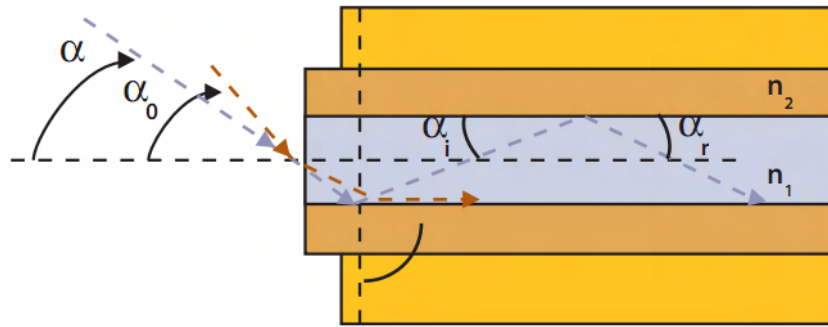


Figura 3.3: Reflexão da luz.

Comercialmente, fibras ópticas podem ser classificadas em monomodo ou multimodo. O tipo da fibra está diretamente relacionado com o diâmetro do núcleo e da blindagem, e como a luz trafega através dela. Fibras monomodos possuem um núcleo menor, com dimensões típicas de 8 a 12  $\mu m$ , entretanto, comparada as multimodos, o desempenho destas é melhor em largura de banda e atenuação [3].

### 3.3 Degradação de sinal em fibras ópticas

Existem dois fatores principais que limitam a capacidade de transmissão em um sistema de comunicação óptica: a atenuação e a dispersão [20].

#### 3.3.1 Atenuação

Para que a transmissão por fibra óptica aconteça é primordial que a potência da luz que chega em um receptor seja suficiente para que este interprete o sinal, caso contrário, ruído e sinal não são distinguidos e não é possível regenerar a informação transmitida. A atenuação nada mais é que a diminuição da potência óptica ao longo do enlace. Este fator é determinante para que haja comunicação e também condiciona as distâncias máximas de separação entre repetidores e amplificadores para redes de longo alcance. O decréscimo da potência é dado em decibel ( $dB$ ), sendo a atenuação dada em  $dB/km$  [20].

Os dois principais mecanismos de atenuação do sinal em fibras ópticas são causados por absorção e por efeito de espalhamento. Na absorção, como diz o próprio nome, a luz é absorvida pelo material da fibra e com isso sua energia é convertida em calor devido a ressonância com impurezas do material em determinados comprimentos de onda. Por exemplo, a ressonância para hidrogênio e hidróxidos ocorre em um comprimento de onda de aproximadamente 1244 nm e 1383 nm. Para os efeitos de

espalhamento, parte da energia da luz é dispersa em todas as direções, atenuando a potência do sinal emitido, com parte dessa energia saindo do núcleo. A pequena porção de luz que retorna ao núcleo gera o chamado retroespalhamento [17].

Dentre os espalhamentos, são destacados Raman, Brillouin e Rayleigh, sendo o espalhamento de Rayleigh o mais importante para análise do sinal OTDR. Na Figura 3.4 [17] é ilustrado o efeito do retroespalhamento na fibra.

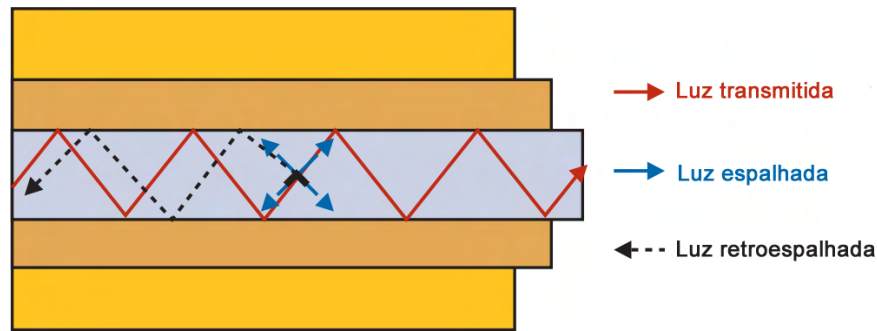


Figura 3.4: Efeito do retroespalhamento na transmissão da luz.

A atenuação depende do tipo da fibra e o comprimento de onda da luz que trafega por ela. Em determinados comprimentos de onda a concentração de íons de hidroxilas na fibra causa um aumento considerável na atenuação do sinal, conforme a Figura 3.5 [19]. Com o passar do tempo a melhora no processo de fabricação da fibra e o uso de dopagem possibilitaram superar alguns dos fatores causadores de atenuação. Com o intuito de distinguir características referentes a determinadas faixas de comprimentos de onda, o padrão ITU-T G.692 definiu larguras de bandas específicas considerando os tipos de serviço mais adequados para cada faixa, de acordo com a Tabela 3.1 [16].

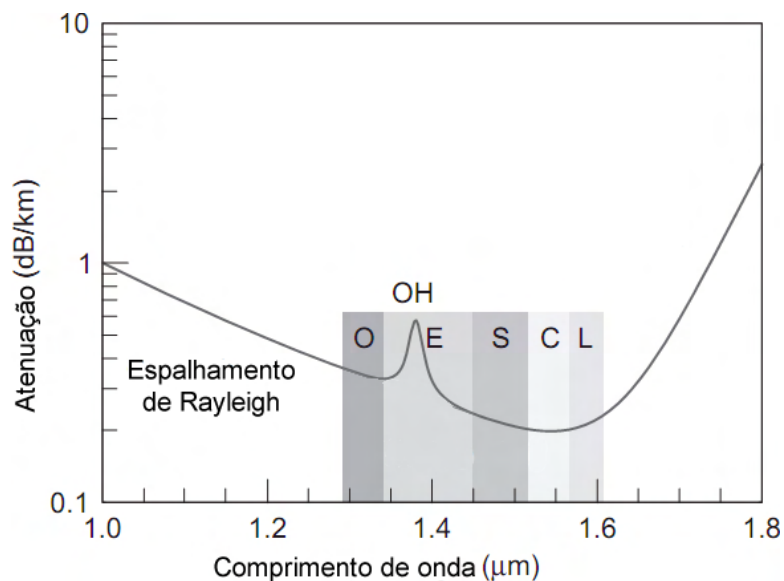


Figura 3.5: Atenuação em fibra de sílica em função do comprimento de onda.

Tabela 3.1: Diferentes bandas para fibras ópticas.

Banda	Descrição	Faixa de Comprimento de Onda
Banda-O	Original	1260 a 1360 nm
Banda-E	Estendida	1360 a 1460 nm
Banda-S	Curta	1460 a 1530 nm
Banda-C	Convencional	1530 a 1565 nm
Banda-L	Longa	1565 a 1625 nm
Banda-U	Ultra Longa	1625 a 1675 nm

Além dos efeitos citados, curvaturas na fibra óptica e a inserção de componentes na rede também são causadores de atenuação. Cada componentes de uma rede óptica possui uma perda inerente que varia conforme sua função na rede. Curvaturas ou dobras são também problemas comuns a rede óptica, podem ser distinguidas em micro-dobras e macro-dobras. Micro-dobras geralmente são causadas durante o processo de fabricação da fibra, assim como as heterogeneidades, e ambas causam desvios do raio de luz propagante. São consideradas macro-dobras curvaturas que tem raio superior a 2 mm, geralmente ocorrem durante o processo de instalação da fibra. A Figura 3.6 [17] ilustra alguns dos efeitos comentados.

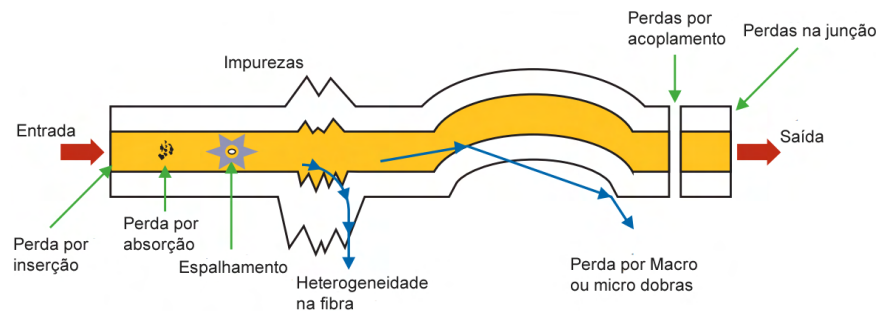


Figura 3.6: Fatores causadores de perdas na fibra.

### 3.3.2 Dispersão

A taxa de transmissão em uma rede óptica está diretamente ligada a dispersão na fibra. O comportamento do sinal propagante na fibra óptica pode variar de acordo com a forma que o sinal é transmitido, as dimensões do núcleo da fibra ou também o material que a compõe, fazendo com que o pulso se alargue e informações sejam perdidas. Existem formas de compensar a dispersão, entretanto este fator ainda é um limitante que reduz consideravelmente a largura de banda efetiva para transmissão [17].

A dispersão da fibra está diretamente ligada com o modo como a luz se propaga. O conceito de modo refere-se a uma solução de uma equação de onda que satisfaça condições definidas e tenha uma distribuição espacial constante quando propagada [25]. Os três principais tipos de dispersão são: dispersão modal, dispersão cromática e dispersão por modo de polarização.

A dispersão modal ocorre em fibras multimodo quando um pulso de luz muito curto é injetado em uma fibra com determinada abertura numérica e toda sua energia não alcança o fim da fibra simultaneamente [17]. Isto ocorre devido aos diferentes caminhos que os raios de luz percorrem na fibra, levando estes raios a dispersar no tempo mesmo quando injetados com a mesma velocidade na fibra [25]. Na Figura 3.7 [17], note que um pulso composto por diferentes comprimentos de onda é injetado na fibra, entretanto os diferentes comprimentos de onda percorrem caminhos distintos causando um alargamento no sinal de saída.

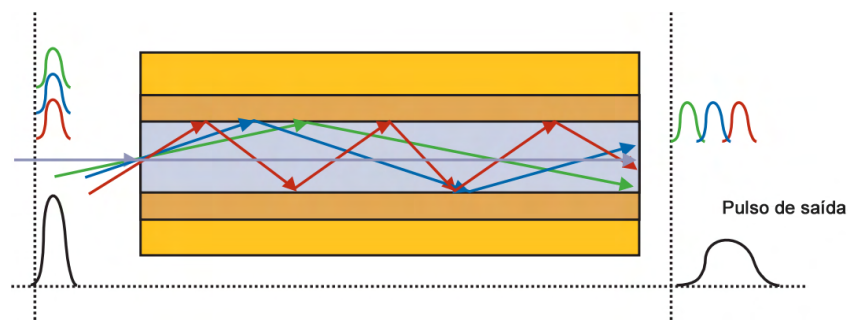


Figura 3.7: Dispersão Modal na fibra.

A dispersão cromática ocorre devido ao fato do pulso de luz ser composto por diferentes comprimentos de onda, fazendo com que cada um se propague com uma velocidade. A diferença de velocidade faz com que o pulso se alargue ao chegar no receptor, reduzindo a relação sinal-ruído (SNR, do inglês *signal-to-noise ratio*) e aumentando a taxa de erros de bits (BER, do inglês *Bit Error Rate*) [25]. Este tipo de dispersão ocorre em fibra monomodo, na Figura 3.8 [17] seu comportamento é ilustrado.

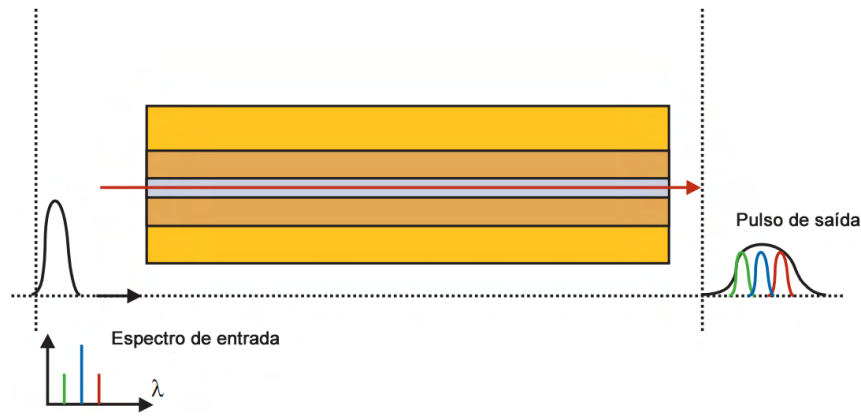


Figura 3.8: Dispersão Cromática na fibra.

A dispersão por modo de polarização, ou PMD (do inglês *Polarization Mode Dispersion*), é uma propriedade básica de fibras monomodo que afeta na magnitude da taxa de transmissão. Dado que um comprimento de onda pode ser dividido em dois eixos de polarização, este efeito retrata a diferença de velocidade de propagação entre estes dois eixos em um mesmo comprimento de onda. A principal causa deste tipo de dispersão é a não uniformidade do diâmetro da fibra e também outros fatores externos como dobras, variação de temperatura, etc [25]. Na Figura 3.9 [17] é mostrado o efeito do atraso entre os eixos de polarização,  $V_1$  e  $V_2$  são as velocidades de cada eixo.



Figura 3.9: Dispersão por Modo de Polarização na fibra.

### 3.4 OTDR

A técnica de OTDR é bastante utilizada para caracterizar enlaces ópticos. Com ela é possível estimar parâmetros tais como atenuação, comprimento, conexões e perdas nos conectores, bem como a identificação e localização de falhas no enlace óptico. Seu funcionamento se dá através da emissão de curtos e intensos pulsos de luz na fibra a fim de medir o sinal óptico refletido após o lançamento, retornando um sinal retroespalhando em função do tempo [3]. Os pulsos ópticos que se propagam ao



longo da fibra podem sofrer reflexão e espalhamento, resultando num fracionamento do sinal a ser refletido. O sinal retornado ao OTDR locomove-se na direção oposta ao sinal emitido, por conta disso experimentos com OTDR geram uma atenuação dobrada. Em casos reais a curva OTDR é normalizada em uma escala de dois a fim de compensar essa atenuação [2].

A forma de determinar os eventos que ocorrem no enlace óptico por meio do OTDR baseia-se principalmente na reflexão de Fresnel e no espalhamento de Rayleigh [3].

A reflexão de Fresnel é um fenômeno que provém da reflexão da luz quando esta transpõe dois meios com índice de refração diferentes. Em conectores, o ângulo formado entre a fibra e o raio de luz incidente é também um fator determinante para este efeito. Sendo assim, verifica-se a reflexão de Fresnel em pontos em que fibra entra em contato com o ar ou outro meio (como conectores, emendas, etc) e por isso, é comum verificar seu efeito nas terminações do enlace [17]. Para uma interface clivada perpendicularmente ao eixo da fibra, o coeficiente de luz refletida não excederá 4% [32]. Tendo uma potência de luz incidente  $P_0$ , com  $n_{fibra}$  e  $n_{ar}$  sendo os índices de refração na fibra e no ar, a potência refletida  $P_{refl}$  é dada pela equação [3]

$$P_{refl} = P_0 \left( \frac{n_{fibra} - n_{ar}}{n_{fibra} + n_{ar}} \right)^2. \quad (3.5)$$

Nos demais eventos detectados, o espalhamento de Rayleigh é o principal efeito analisado. Este fenômeno é causado devido irregularidades submicroscópicas na composição e na densidade do material da fibra. Em consequência disso, ocorrem flutuações no valor do índice de refração do material ao longo da fibra, desta maneira os feixes de luz que viajam na fibra são espalhados resultando em perdas. Através do aperfeiçoamento dos processos de fabricação, as irregularidades na fibra vêm sendo controladas, contudo as originadas por diferenças na densidade do material são intrínsecas a este, e não podem ser evitadas [32].

Fisicamente, o espalhamento de Rayleigh se dá quando o comprimento de onda  $\lambda$  da luz incidente é muito maior que as dimensões do átomo. A probabilidade de ocorrência desse espalhamento é inversamente proporcional ao comprimento de onda elevado a quarta potência [31]. Portanto, quanto maior a frequência de uma luz incidente, sabe-se que menor será o comprimento de onda desta. Considerando a probabilidade de ocorrência de Rayleigh  $P(RS)$ , então para um menor comprimento de onda, maior a chance desses efeito ocorrer, daí uma justificativa do uso desse efeito para monitorar redes ópticas de acesso, ou seja,

$$P(RS) \sim \frac{1}{\lambda^4}. \quad (3.6)$$

Um equipamento de OTDR é composto conforme mostra a Figura 3.10 [17]. O diodo laser do OTDR é um conversor elétrico-óptico acionado por um gerador de pulsos. O pulso de luz é acoplado numa fibra em teste via um acoplador direcional óptico. As reflexões geradas pelo retroespalhamento e pela reflexão de Fresnel retornam ao acoplador direcional e são encaminhadas para o fotodiodo, do tipo avalanche (APD), que converterá o sinal óptico em um sinal elétrico. O sinal elétrico é amplificado e enviado para um microprocessador que calcula o atraso de propagação e a atenuação percebida pelo APD. A tela do OTDR apresenta os resultados num formato gráfico que permite a caracterização do estado da fibra [32].

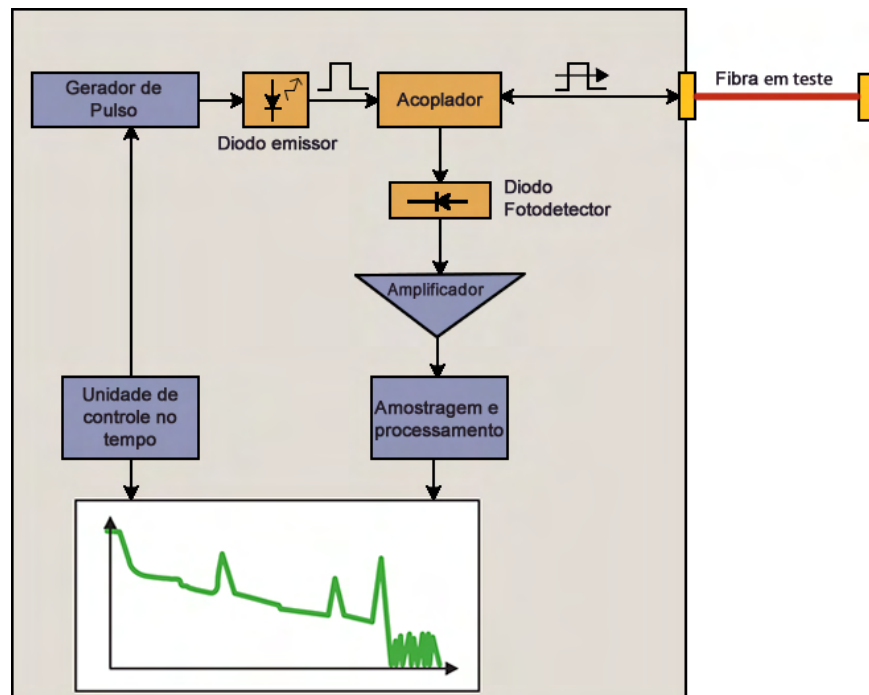


Figura 3.10: Diagrama de funcionamento de um equipamento OTDR.

### 3.4.1 Parâmetros OTDR

Os parâmetros identificados por um OTDR são: o tempo em que o pulso é enviado na fibra, a largura do pulso emitido e a velocidade de propagação. O tempo em que o pulso de luz gasta para viajar pela fibra, se refletir e voltar para o detector do equipamento de OTDR pode ser medido precisamente. Conhecendo-se esse tempo, o OTDR pode calcular a distância  $d$ , a partir da fórmula [32]

$$d = \frac{V_g t}{2} = \frac{C \cdot t}{2n_g}, \quad (3.7)$$

onde  $V_g$  é a velocidade de grupo que a luz se propaga na fibra,  $t$  é o intervalo entre o sinal transmitido e o recebido,  $C$  é a velocidade da luz no vácuo,  $n_g$  é o índice de refração de grupo na fibra.

Outras características importantes de um OTDR que devem ser citadas são o alcance dinâmico (ou *Dinamic Range*) e a zona morta.

O alcance dinâmico é a diferença de nível de retroespalhamento no início da fibra e o nível de ruído alcançado no final do enlace onde a relação sinal/ruído é igual a 1, medido em dB. Em outras palavras, o alcance dinâmico define o máximo comprimento observável da fibra, considerando-se a atenuação na fibra, nas emendas e nas conexões [17]. Considera-se que quanto maior o comprimento da fibra, mais o sinal retroespalhado se aproxima do ruído, aumentando assim a margem de erro das medidas e fazendo com que pequenos eventos sejam dificilmente detectados [32].

O equipamento OTDR envia pulsos repetidamente na fibra. São tiradas médias dos resultados para que o ruído aleatório do receptor seja suavizado no tempo. Na tela do equipamento, o nível do ruído será reduzido com o tempo. Quanto maior o tempo, maior será o alcance dinâmico. As maiores melhorias do sinal ocorrem no primeiro minuto [33].

A zona morta, ou resolução espacial, é definida como a distância entre o início de um evento e o ponto consecutivo onde outro evento pode ser detectado [32]. Este parâmetro é crucial para a captura do sinal retroespalhado pelo equipamento de OTDR, por exemplo, se a zona morta de um OTDR é de 100 metros então eventos que ocorrerem dentro dessa margem possivelmente não serão distinguidos individualmente, sendo mostrada uma atenuação relativa ao somatório de eventos ocorridos nesse intervalo, isto é, diferentes eventos ocorridos nessa extensão serão interpretados como um único evento.

### 3.4.2 Interpretação de curvas OTDR

Como já foi dito, a técnica OTDR pode estimar diversos parâmetros, tais como atenuação, comprimento da fibra, conexões e perdas nos conectores, identificação e localização de falhas. Neste trabalho, convencionou-se que no sinal que é obtido pelo uso de OTDR, todas as manifestações dos parâmetros citados são definidos como eventos. Sendo assim, cada evento tem uma identidade relacionada a seu efeito físico. A seguir são vistos alguns dos sinais, ou curvas, de eventos comumente encontrados em enlaces ópticos. Na curva OTDR, o eixo vertical é dado em dB e o eixo horizontal representa a distância em metros.

#### Fibra sem eventos

São caracterizadas por um decaimento contínuo entre dois pulsos, como mostra a Figura 3.11 [34]. O primeiro pulso é causado pela reflexão de Fresnel na conexão do equipamento de medição com a fibra, enquanto que o segundo é causado pelo mesmo fenômeno na junção do final da fibra com o receptor. Este efeito é resultado da reflexão parcial do sinal incidente nessas interfaces [32]. O decaimento apresentado, é produzido pelo espalhamento de Rayleigh, causando atenuação do sinal em seu percurso através da linha. Valores típicos para atenuação em fibras ópticas estão em torno de 0,2 dB/km. Após o final da fibra o sinal decai bruscamente, sendo verificado somente o ruído. Em equipamentos de OTDR, quedas de 3 a 7 dB são identificadas como fim do enlace [4].

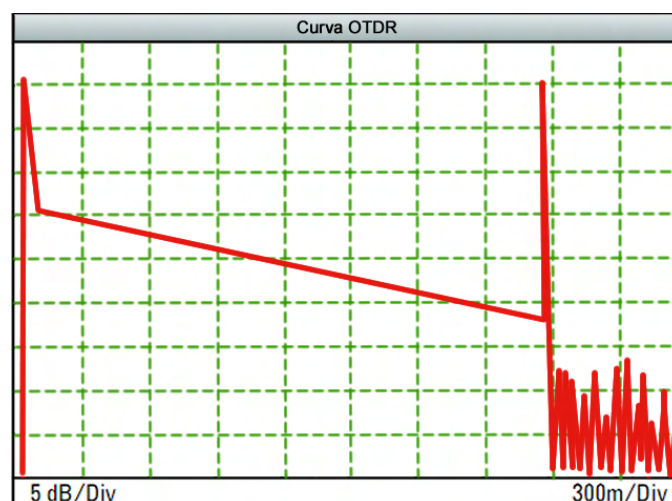


Figura 3.11: Curva OTDR para uma fibra sem eventos atenuadores.

### Fim da fibra ou quebra

São representados de duas maneiras. Para uma fibra onde existe um receptor na extremidade, observa-se o efeito da reflexão de Fresnel, de acordo com a Figura 3.12 [34], representado por um pico ao final da fibra seguido de uma forte queda no nível do sinal. Por outro lado, se uma fibra for quebrada, o evento detectado segue o padrão mostrado na Figura 3.13 [34]. Pelo fato de quebras na fibra serem eventos não-refletivos, é possível perceber a ausência do pico que geralmente é apresentado no final do enlace, isto acontece devido a total dispersão do sinal propagante, não existindo nenhum retorno ao equipamento OTDR.

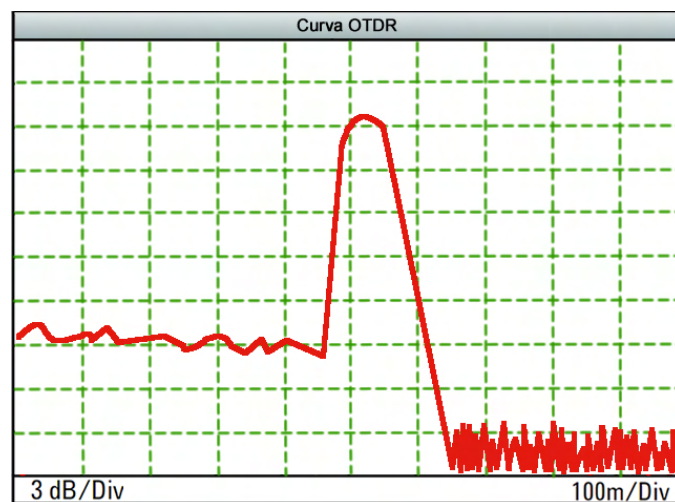


Figura 3.12: Curva OTDR comum para o fim de uma enlace.



Figura 3.13: Curva OTDR para uma quebra na fibra ou enlace aberto.

### Conector ou emenda mecânica

Ambos eventos causam reflexão e perda de potência no sinal. São caracterizados por um pico seguido de uma queda no nível do sinal, conforme mostra Figura 3.14 [34]. Este evento ocorre devido a soma da reflexão do sinal que transpõe o conector ou emenda, com o sinal propagante. A adição construtiva da potência é a causa da elevação do nível de potência na emenda.

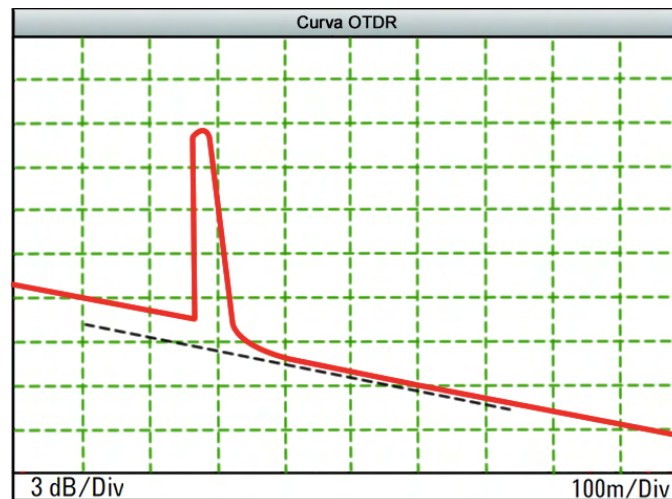


Figura 3.14: Curva OTDR para um conector ou emenda mecânica.

### Emenda de fusão

São eventos não-refletivos caracterizados por uma mudança no nível do sinal de retroespalhamento. Na Figura 3.15 e na Figura 3.16 [34] é apresentado o comportamento da curva OTDR para ambos eventos. Nota-se que no primeiro caso há somente um desnível na potência do sinal. Em emendas de fusões atuais tem atingido tal nível a tornar este tipo de queda quase invisível [34]. No segundo caso, uma emenda mal feita é apresentada, é possível notar que ocorre um ganho na potência do sinal, isto acontece devido a diferença nos coeficientes de retroespalhamento na fibra antes e depois da emenda [34].

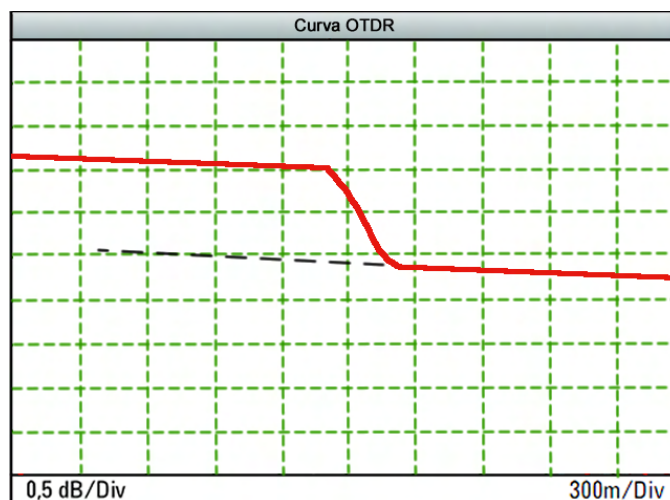


Figura 3.15: Curva OTDR para uma emenda de fusão.

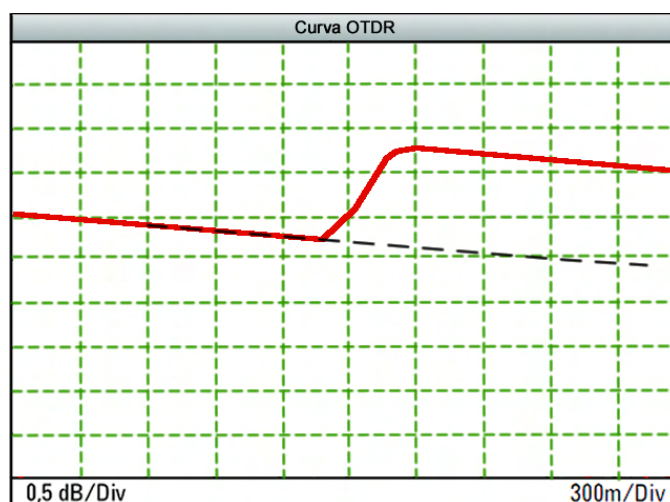


Figura 3.16: Curva OTDR para uma emenda de fusão com ganho.

### Dobras no enlace

São eventos não-refletivos provocados por alterações mecânicas na estrutura da fibra. Este tipo de evento tem comportamento idêntico ao apresentado na Figura 3.15. Seu efeito provém do aumento da dispersão no interior da fibra devido a dobra, causando a fuga do sinal de luz do núcleo da fibra e consequentemente a perda de potência. A forma de distinguir dobras e emendas na fibra está diretamente relacionada com a planta de instalação da fibra, isto é, verifica-se onde há e não há emendas, para que por exclusão conclua-se uma dobra.

### Rachaduras ou fendas

São eventos relacionados à qualidade da estrutura do material que compõe a fibra. Seu sinal característico é composto por um pico mais acentuado seguido de queda com sinal irregular, conforme ilustra a Figura 3.17 [34]. Uma forma de se observar eventos desas categoria baseia-se em aumentar a faixa dinâmica de um sinal OTDR, desta maneira é possível identificar de forma mais detalhada os eventos que ocorrem na fibra, conforme é mostrado em [6].

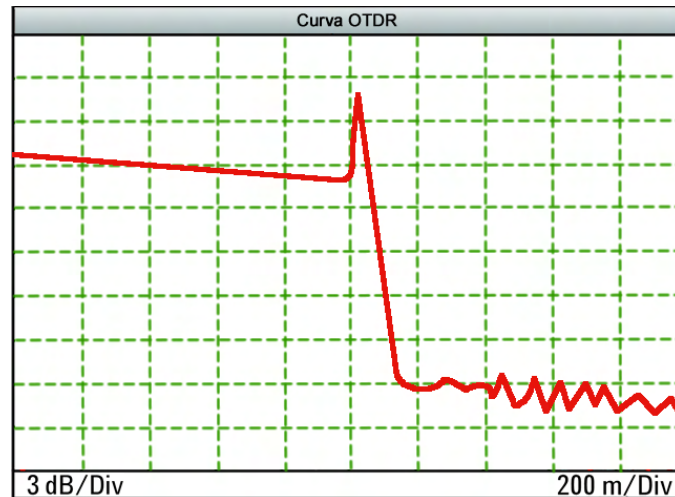


Figura 3.17: Curva OTDR para uma rachadura ou fenda.



# Capítulo 4

## Modelagem da rede WDM-PON

Neste capítulo são apresentadas as etapas de construção da simulação de uma rede óptica WDM-PON. A rede modelada possui 32 emissores sendo transmitidos ao longo do enlace a 32 usuários, ou ONUs. O intuito da simulação é proporcionar um cenário que possibilite a avaliação da integridade da fibra a partir do uso de reflectometria óptica no domínio do tempo.

### 4.1 Software *VPI Photonics*<sup>TM</sup>

Para a construção do modelo da simulação foi utilizado o software *VPItransmissionMaker*<sup>TM</sup>, da empresa *VPI Photonics*<sup>TM</sup>, na versão 9.0. Este software oferece um ambiente rico para projetos de fotônica, permitindo o detalhamento da rede além de fornecer uma boa documentação dos componentes e exemplos que abordam aplicações recorrentes. Os sistemas ópticos do *VPItransmissionMaker*<sup>TM</sup> incluem transmissões ópticas de curto, médio e longo alcance e permite a atualização da tecnologia e a substituição de componentes a serem desenvolvidos para plantas de rede existentes [12].

### 4.2 Descrição da rede projetada

#### 4.2.1 Descrição geral

O modelo da rede utilizada, baseado em [2], consiste de um enlace com 35 km de extensão, onde são introduzidos eventos em trechos distintos da rede para sejam analisados utilizando OTDR. A Figura 4.1 mostra um diagrama explicando o modelo de rede utilizado. Ele consiste de 32 lasers de onda contínua (CW, do inglês *Continuous Wave*), representando os sinais de informação, que são acoplados na fibra juntamente com um sinal de monitoramento, também produzido por um laser CW espaçado de

8,3 THz do primeiro sinal de informação. Com isso ambos sinais são propagados durante 30 km da fibra até a chegada no AWG. No AWG o sinal de informação é separado para então ser enviado a seu respectivo usuário. No mesmo ponto, o sinal de monitoramento é filtrado e enviado a um componente divisor que fica responsável por replicar o sinal para na sequência ser acoplado junto com o sinal de informação proveniente do AWG, dessa maneira é possível monitorar quaisquer dos canais apresentados.

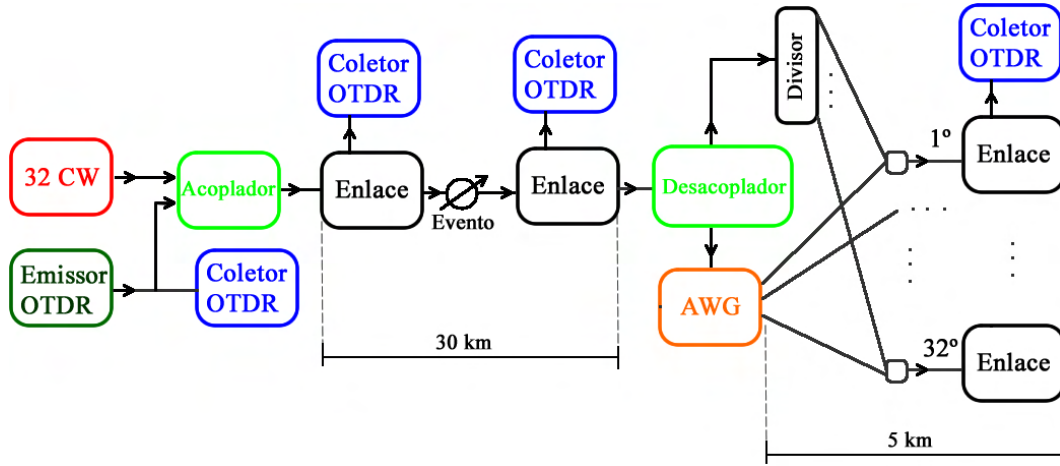


Figura 4.1: Modelo ilustrativo da rede.

Na Figura 4.2 é mostrado como a rede foi modelada no software *VPITransmissionMaker*. Para facilitar a compreensão na rede, um conjunto de componentes foram encapsulados em um único bloco de mesma função, tais blocos serão descritos no decorrer deste capítulo. Dentro da Figura 4.2 foi utilizada a seguinte numeração para os blocos encapsulados e suas respectivas funções na rede:

- **Bloco 1:** representam os 32 lasers CW;
- **Bloco 2:** representa o laser emissor da modelagem OTDR;
- **Bloco 3:** representam os coletores de potência da modelagem OTDR;
- **Bloco 4:** representam os acopladores de sinal;
- **Bloco 5:** representam os enlaces com determinados comprimentos;
- **Bloco 6:** representa o AWG.

A seguir todos os blocos são descritos, explicitando seus parâmetros e a sua respectiva função na rede.

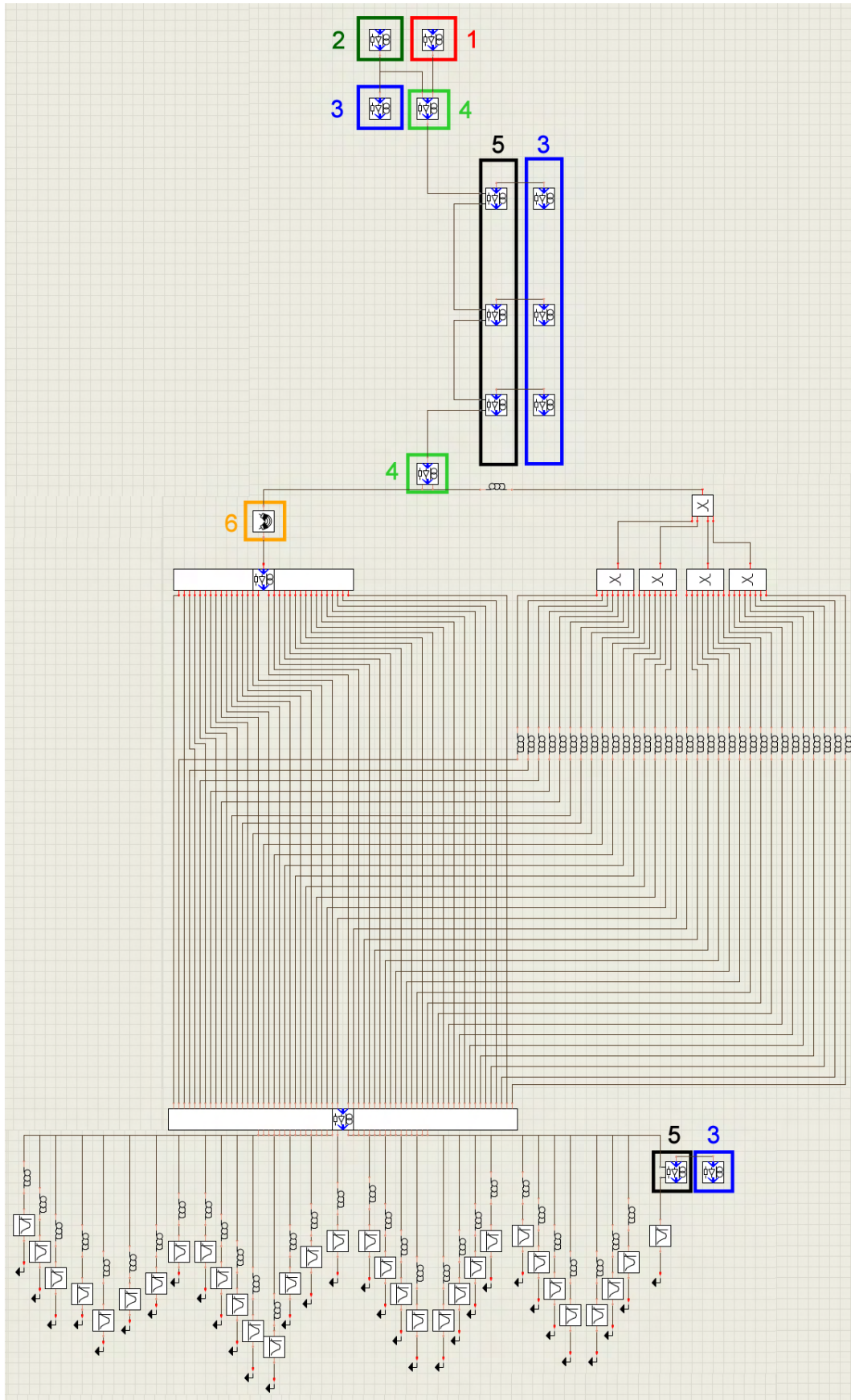


Figura 4.2: Modelo da rede simulada sem eventos.

Seguindo a Figura 4.2, tem-se a presença do emissor OTDR no início do enlace que emite o comprimento de onda de monitoramento para toda a rede. O sinal de saída deste bloco é enviado para o acoplador juntamente com o sinal dos 32 comprimentos de ondas que representam informações da central a serem transmitidas, para então serem introduzidos no enlace.

Ainda na Figura 4.2, os coletores do OTDR fazem a monitoramento do sinal da rede. Este dispositivo funciona coletando valores de potência ao longo do enlace para que, em relação à potência de entrada, seja possível traçar a curva de atenuação e verificar os possíveis eventos na fibra a partir das mudanças no sinal.

O sinal segue então para o modelo do enlace óptico. Além de serem o meio de transmissão, estes blocos também são responsáveis por repassar valores de potência para o coletor OTDR durante a execução do processo de simulação. Continuando a descrição da rede, os sinais de informação e de monitoramento após percorrerem o enlace, chegam em um desacoplador onde são filtrados, sendo o sinal de informação enviado para o AWG e o sinal de monitoramento enviado para um barramento que replica o sinal para posteriormente ser acoplado em cada um dos 32 canais. Este processo possui importância pelo fato de o AWG permitir apenas a passagem do comprimento de onda referente a um usuário, sendo assim é necessário separar o sinal de monitoramento para depois introduzi-lo em cada um dos 32 comprimentos de onda. Após a passagem dos sinais pelo AWG, é usado outro barramento para unir cada sinal de informação com um sinal de monitoramento, e então seguir mais 5 km de fibra chegando até o usuário, desta maneira é possível monitorar o comportamento de qualquer ramo da rede.

### 4.2.2 Blocos de simulação

Neste tópico é falado de alguns dos sub-blocos presentes no esquemático da simulação. Foi dado enfoque aos blocos que possuem uma quantidade maior de componentes ou que possuam uma relevância determinante no funcionamento do sistema.

#### Bloco de emissores

Representam as informações emitidas pela central telefônica, ou OLT. O bloco é composto por 32 lasers CW, espaçados de 100 GHz entre si, e um multiplexador com função de acoplar os 32 sinais. Todos os lasers possuem potência de 1 mW e taxa de amostragem padrão, sendo o primeiro laser na frequência de 192,8 THz e o último laser na frequência 195,9 THz. A Figura 4.3 demonstra como o bloco foi construído.

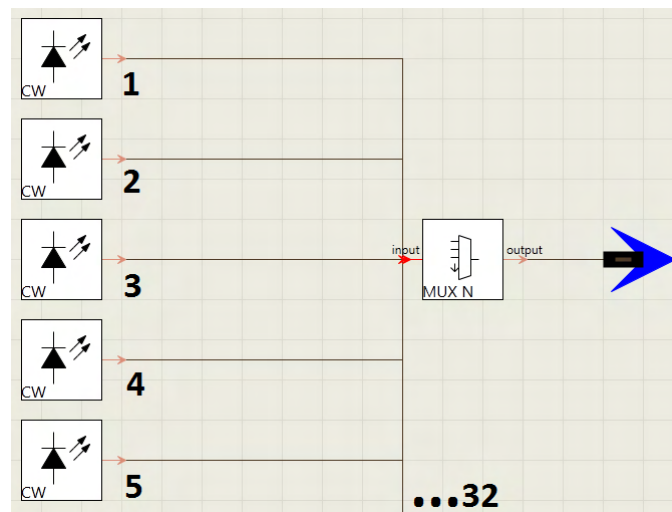


Figura 4.3: Barramento de divisão dos 32 sinais de informação após o AWG.

O multiplexador possui perda por inserção de 0,3 dB, o que se reflete posteriormente na perda inicial da curva OTDR. Apesar de não haver representação da reflexão de Fresnel, geralmente no início de uma curva OTDR existe um pico proveniente desta reflexão e um decaimento advindo da perda por inserção.

### Blocos OTDR

Para que o OTDR funcione é necessário que um pulso óptico seja enviado através da fibra. A partir do reflexo deste pulso são analisados os eventos na fibra. O bloco responsável por emitir o pulso é demonstrado na Figura 4.4, ele é composto por um laser CW no comprimento de 1626 nm (184.5 THz), um gerador de bits que ativa um gerador de pulsos e um modulador de amplitude óptica que modula o sinal do laser de acordo com os pulsos elétricos. A Tabela 4.1 apresenta os parâmetros do laser utilizado.

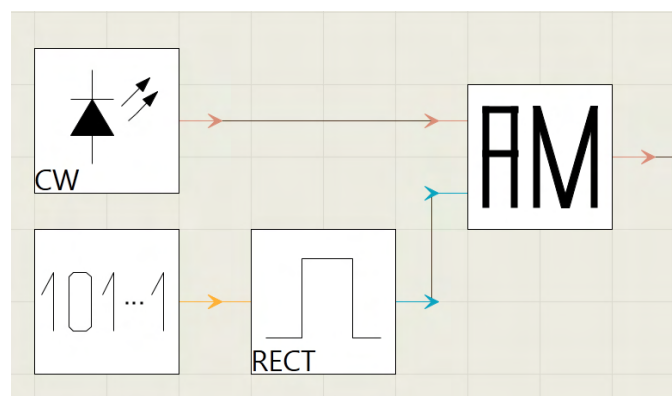


Figura 4.4: Bloco de emissão do pulso OTDR

Tabela 4.1: Parâmetros do Laser CW do Emissor OTDR.

Parâmetro	Valor do CW
<b>Frequência de Emissão</b>	184,5 THz
<b>Taxa de Amostragem</b>	160 GHz
<b>Média de Potência</b>	1 mW
<b>Largura de Linha</b>	10 MHz
<b>Frequência de Banda Central</b>	184,5 THz

Depois de enviado o pulso de monitoramento, os blocos de coleta de dados entram em ação. Tais blocos funcionam a partir de um medidor de potência que envia o sinal para um sistema de cossimulação (CoSim), conforme a Figura 4.5. Após a coleta de dados pela cossimulação, os valores retornam ao simulador para serem apresentados em seu próprio analisador. O sistema de cossimulação utiliza o software *Matlab* que roda um *script* responsável por coletar os valores de potência, ajustar os dados para serem apresentados, salvar um arquivo com os pontos para posteriormente apresentar em um único gráfico os pontos concatenados.

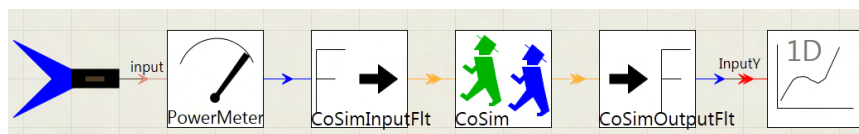


Figura 4.5: Blocos de coleta de dados

Os parâmetros usados no bloco de cossimulação são apresentados Tabela 4.2. Lembrando que para cada ponto de coleta de potência, sendo ela a potência de entrada ou o valor de potência ao longo do enlace, existe um *script* próprio mostrado no Apêndice A, ao fim deste trabalho.

Tabela 4.2: Parâmetros do bloco de cossimulação.

Sub-Bloco	Parâmetro	Valor
Medidor de Potência	<b>Frequência Central</b>	184,5 THz
Medidor de Potência	<b>Seleção de Banda</b>	Sim
Entrada da Cossimulação	<b>Arquivo</b>	input
Saída da Cossimulação	<b>Arquivo</b>	input
Bloco de Cossimulação	<b>CoSim</b>	Matlab
Bloco de Cossimulação	<b>Executar/" Rodar"</b>	(Nome do <i>Script</i> )
Bloco de Cossimulação	<b>Diretório</b>	C:/Users/VPI/Desktop/RenanAlmeida

### Bloco de Receptores

Possuem função de receber o sinal óptico após percorrer o enlace. Isto é, essa terminação pode significar o usuário (ONU) ou uma ONT de onde o sinal pode ser redistribuído. Como não há interesse em usar o sinal recebido, este trecho é modelado por um filtro e um “terra”. As características do filtro são ajustadas de forma a permitir a passagem somente do sinal de informação, com parâmetros descritos na Tabela 4.1. Na Figura 4.6 é ilustrada a composição do bloco com suas 32 terminações. Além disso é mostrada a fibra de 5 km que provém do barramento que une o sinal de monitoramento com o sinal de informação.

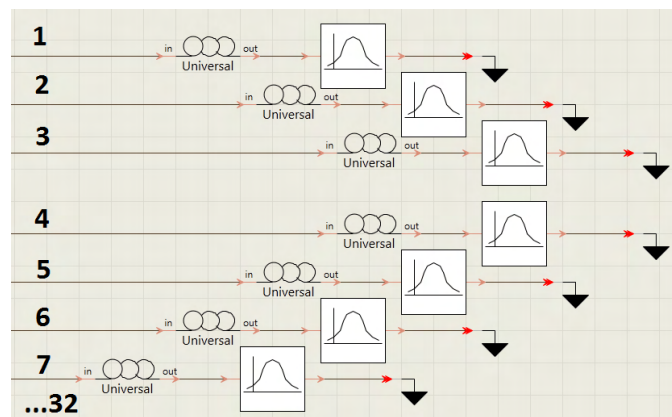


Figura 4.6: Barramento de divisão dos 32 sinais de informação após o AWG.

### Acopladores

A modelagem dos acopladores é feita basicamente por multiplexadores ou demultiplexadores e dois filtros. Um filtro fica responsável por permitir a passagem do sinal de monitoramento e o outro pelos sinais de dados (32 lasers CW). O segundo filtro deve possuir uma largura de banda suficiente para que todos os sinais CW sejam filtrados. Nas Figuras 4.8 e 4.7 é vista respectivamente a modelagem do desacoplador e do acoplador.

No início da fibra é necessária a introdução de um acoplador para que o sinais de monitoramento e de informação possam ser transmitidos juntos no enlace. Os multiplexadores usados no acoplador e desacoplador têm 0,3 dB de perda por inserção e tipo de filtragem passa-banda. Na Tabela 4.3 são descritos os parâmetros de configuração dos filtros presentes tanto do multiplexador quando do demultiplexador.



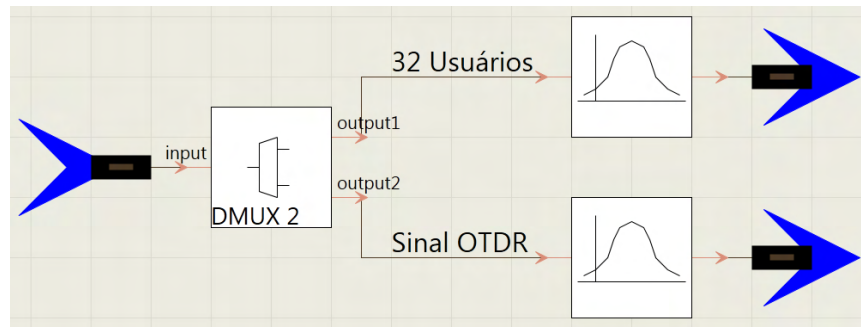


Figura 4.7: Bloco de demultiplexação

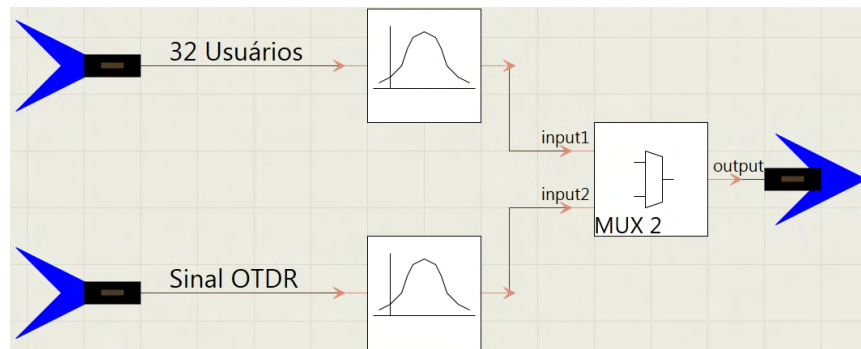


Figura 4.8: Bloco de multiplexação

Tabela 4.3: Parâmetros dos filtros presentes nos acopladores.

Parâmetro	Filtro Sinal OTDR	Filtro Sinal Informação
<b>Tipo</b>	Passa Banda	Passa Banda
<b>Função de Transferência</b>	Trapezoidal	Trapezoidal
<b>Largura de Banda</b>	400 GHz	1 THz
<b>Banda de Parada</b>	800 GHz	2 THz
<b>Atenuação de Fim de Banda</b>	50 dB	50 dB
<b>Frequência Central</b>	184,5 THz	194,4 THz
<b>Resolução de Ruído</b>	25 GHz	25 GHz

Sabendo que o AWG não permite a passagem do sinal de monitoramento, existe a necessidade de introduzir desacopladores que permitam que sinal de monitoramento e o sinal de informação sejam separados. Dessa maneira é possível fazer com que o sinal de monitoramento contorne o AWG para então ser introduzido nos 32 canais de transmissão. Para que isso ocorra, o sinal de monitoramento é replicado pelo barramento/*switch* da Figura 4.11, para posteriormente ser introduzido individualmente nos 32 canais que são emitidos para os usuários.



## Enlace Óptico

A configuração do enlace óptico possibilita que a coleta da potência dos sinais seja efetuada pelos blocos de cossimulação. Isto se dá pelo fato deste bloco ser composto de um elemento repetidor que simboliza a passagem do sinal várias vezes em comprimentos múltiplos de uma fibra em que o repetidor é introduzido, ou seja, se a fibra possui 100 metros e o repetidor está configurado como 10, então haverá dez coletas sendo uma a cada 100 metros.

Para que na direção contra-propagante da fibra seja emitido o sinal de reflexão, o retorno da fibra foi alimentado pela saída do repetidor. Dessa maneira, a cada passagem pelo repetidor, a potência do sinal retroespalhado é enviada na direção oposta a propagação da fibra, para então ser detectada pelo bloco de OTDR. Antes de ser emitido o sinal ao bloco de OTDR existe um filtro com intuito de permitir somente a passagem do comprimento de onda referente ao sinal de monitoramento.

Nesta modelagem, o enlace principal, ou enlace alimentador, possui a extensão de 30 km, sendo composto por blocos de 6, 21 e 3 quilômetros. Esta configuração é feita com o propósito de introduzir atenuações entre estas distâncias. A Figura 4.9 mostra o bloco que representa o enlace óptico.

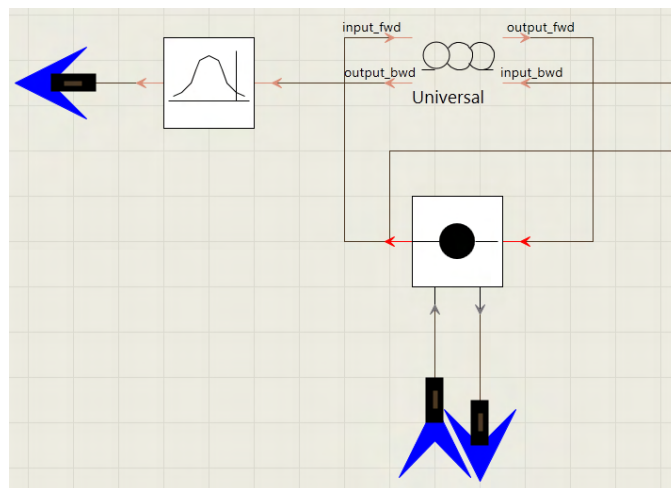


Figura 4.9: Bloco de enlace com repetidor (*loop*).

A modelagem do enlace é composta pelos seguintes componentes: uma fibra universal (nomenclatura dada pelo software), um repetidor (*loop*) e um filtro. Os repetidores estão configurados em 60, 210 e 30 respectivamente aos trechos dos enlaces; o filtro está configurado para permitir a passagem somente do sinal OTDR, seus parâmetros de configuração foram vistos na primeira coluna da Tabela 4.3; e por fim os parâmetros da fibra óptica são descritos na Tabela 4.4.

Tabela 4.4: Parâmetros da fibra universal.

Parâmetro	Valor na Fibra
<b>Número de Spans da Fibra</b>	Passa Banda
<b>Comprimento</b>	100 m
<b>Índice de refração de grupo</b>	1,47
<b>Atenuação</b>	0,2 dB/km
<b>Frequência de referência</b>	193,1 THz
<b>Dispersão</b>	$16 \cdot 10^{-6} \text{ s/m}^2$
<b>Espalhamento de Raman</b>	Não
<b>Espalhamento de Rayleigh</b>	Sim
<b>Descrição do Retroespalhamento</b>	OTDR
<b>Índice Efetivo de Grupo</b>	1,47
<b>Descrição de Rayleigh</b>	Coefficiente de Rayleigh
<b>Análise de Polarização</b>	Escalar
<b>Análise Bidirecional</b>	Completa
<b>Campo de análise</b>	Bidirecional

### Barramentos

São utilizados três barramentos em toda a modelagem: após a enlace central, após o AWG e antes dos ramos de 5 km de fibra. O primeiro barramento, mostrado na Figura 4.10, é na verdade composto por 5 *switchs* de dois tipos: uma entrada para quatro saídas (1x4) e uma entrada para oito saídas (1x8). Estes componentes possuem a função de replicar o sinal de monitoramento 32 vezes. Os parâmetros do *switch* são: perda por inserção, configurado em 0,5 dB, e *crosstalk*, configurado em 0 dB. É importante ressaltar que o parâmetro de *crosstalk* tem por objetivo simular a interferência de um canal de entrada em canais paralelos ao de referência. Como nesta aplicação, o componente *switch* só possui a função de replicar o sinal de referência, não há necessidade de introduzir *crosstalk* no mesmo.

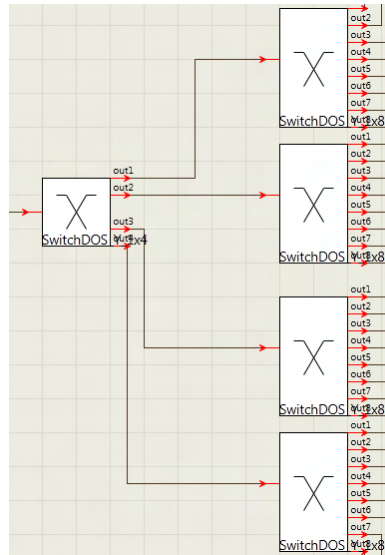


Figura 4.10: Barramento de passagem do sinal de monitoramento.

O barramento após o AWG, mostrado na Figura 4.11, é somente um artifício para demonstrar que os sinais de dados estão sendo separados em 32 canais, e o barramento localizado antes da ramificação do enlace, como já foi citado, serve para acoplar o sinal de monitoramento com seu respectivo sinal de informação.

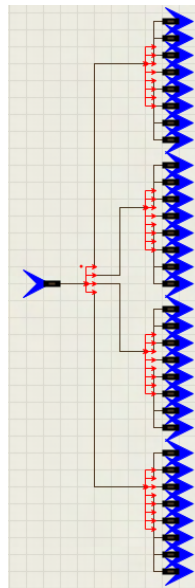


Figura 4.11: Barramento de divisão dos 32 sinais de informação após o AWG.

**AWG**

O componente AWG usado na simulação não define a quantidade de portas, isto é, para  $M$  portas de entradas existem  $N$  portas de saída, sendo  $M \leq N$ . Os principais parâmetros usados para configurar este componente estão listados na Tabela 4.5.

Tabela 4.5: Parâmetros do AWG.

Parâmetro	Valor no AWG
<b>Número de portas de entrada</b>	1
<b>Número de portas de saída</b>	32
<b>Faixa de Frequência de operação</b>	192,5 - 196,1 THz
<b>Frequência do Canal</b>	192,8 THz
<b>Espaçamento de canal de saída (Colorless)</b>	100 GHz Ligado
<b>Faixa Espectral Livre (FSR)</b>	3,5 THz
<b>Resolução de Ruído</b>	25 GHz

# Capítulo 5

## Análise dos resultados

Este capítulo apresenta as curvas obtidas a partir da simulação apresentada.

Para avaliar as curvas OTDR obtidas, sete diferentes cenários foram configurados. Os critérios usados para a escolha dos enlaces foram: a) Combinações de eventos em trechos distintos do enlace. b) Criar um conjunto representativo de curvas OTDR visando validar a eficiência do método de acordo com a perda e o local onde o evento ocorreu.

O processo de avaliação foi composto de duas etapas distintas:

- Determinar pontos do enlace para serem introduzidos eventos;
- Através das medições obtidas, verificar se a atenuação está de acordo com o evento determinado e o local de ocorrência da falta.

### 5.1 Cenários propostos

Com intuito de verificar as perdas em trechos variados do enlace, este foi dividido em três seções. Tratando-se de uma extensão total de 35 km, o enlace antes do AWG foi dividido em uma primeira seção de 6 km, uma segunda de 21 km e uma terceira de 3 km. O trecho de 5 km restantes para completar a fibra é o ramo que leva o sinal até o usuário, isto é, após o AWG. Para todos os eventos foi considerada uma perda de 1 dB configurada por um componente atenuador. Em uma rede física esta perda pode ter origem de emendas mecânicas, curvas, dentre outros eventos. É importante ressaltar que no software de simulação não existem componentes para simular os eventos citados e descritos neste trabalho, por isso foi necessário representá-los por uma atenuação previamente definida. Baseado na localização das perdas, foram criados os seguintes cenários:

- **Cenário 1:** Sem eventos;
- **Cenário 2:** Perda no quilômetro 6;
- **Cenário 3:** Perda no quilômetro 27;
- **Cenário 4:** Perda no quilômetro 30;
- **Cenário 5:** Perda nos quilômetros 6 e 27;
- **Cenário 6:** Perda nos quilômetros 6 e 30;
- **Cenário 7:** Perda nos quilômetros 6, 27 e 30;

### 5.1.1 Cenário sem eventos

Uma vez que não existam eventos de falhas na rede, o sinal retroespalhado em uma fibra com coeficiente de atenuação de 0,2 dB/km, é dado conforme mostra a Figura 5.1, desconsiderando também o efeito dos acopladores e divisores. No entanto, em uma situação prática, sabe-se que os componentes da rede também provocam perda durante o processo de transmissão, tais componentes podem ser acopladores, desacopladores, *switchs*, entre outros. Para a apresentação dos cenários descritos, os componentes geradores de perdas são configurados conforme é mostrado na Tabela 5.1, sendo MUX e DEMUX, respectivamente os componentes multiplexador e demultiplexador presentes nos acopladores, e os dois tipos de *switchs* apresentados na Figura 4.11. Não foram considerados eventos refletivos, como por exemplo a reflexão de Fresnel, por não ser de interesse deste trabalho analisar este tipo de fenômeno, sendo assim somente eventos não-refletivos são retratados.

Tabela 5.1: Tabela de perda na rede sem eventos.

Componente	Perda por Inserção
MUX 2x1	0.3 dB
DEMUX 1x2	0.3 dB
Switch 1x4	0.5 dB
Switch 1x8	0.5 dB

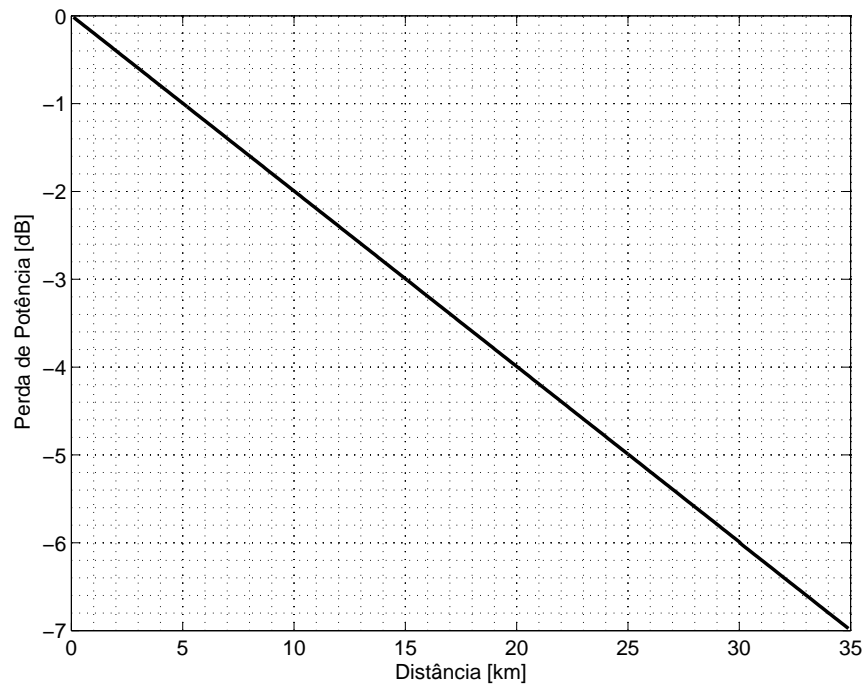


Figura 5.1: Curva OTDR da rede sem perdas por inserção.

Utilizando a rede proposta sem a presença de eventos, porém incluindo as perdas dos componentes, gerou-se a curva OTDR mostrada na Figura 5.2. No início do enlace nota-se que a perda por inserção de 0,3 proveniente do primeiro acoplador. No quilômetro trinta do enlace a divisão do sinal de monitoramento no *switch* somada a perda do acoplador resultou em uma perda de 1,27 dB.

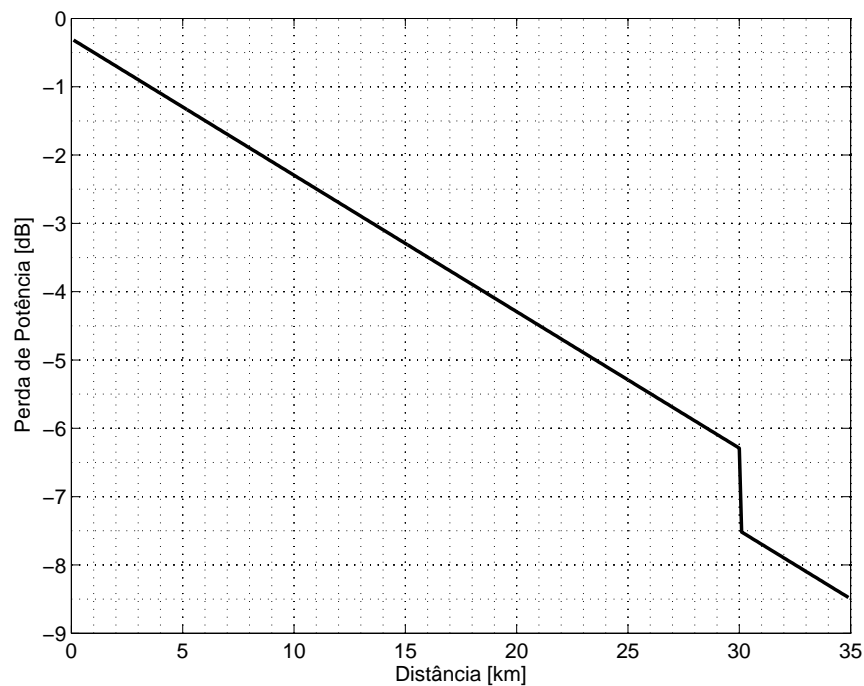


Figura 5.2: Curva OTDR da rede com perdas por inserção.

### 5.1.2 Cenário com perda no 6º km

Neste cenário foi introduzida uma atenuação de 1 dB no sexto quilômetro do enlace. Na Figura 5.3 verifica-se uma queda corresponde ao evento configurado e também no trecho em que há divisão do enlace para os 32 usuários, devido a perda dos componentes.

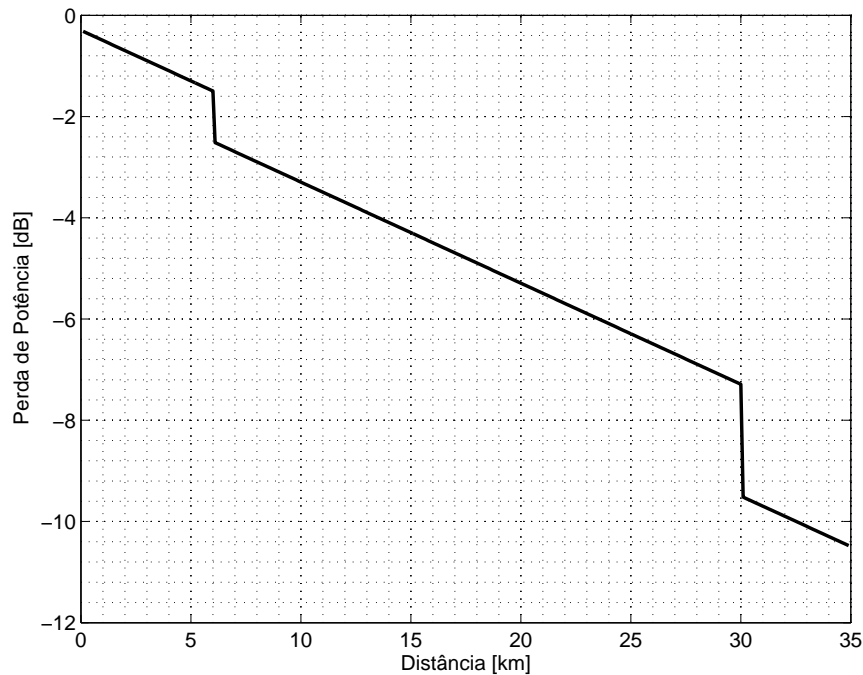


Figura 5.3: Curva OTDR do Cenário 2.

### 5.1.3 Cenário com perda no 27º km

Neste cenário foi introduzida uma atenuação de 1 dB no quilômetro 27 do enlace. Na Figura 5.4, a curva OTDR é mostrado. Verifica-se uma queda que corresponde ao evento configurado e também no trecho em que há divisão do enlace para os 32 usuários, devido a perda dos componentes.



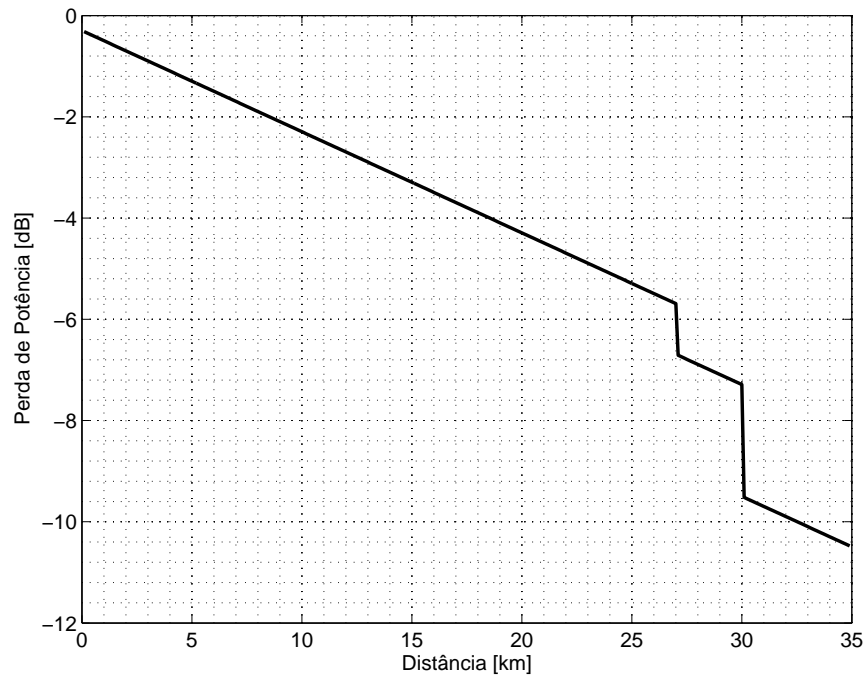


Figura 5.4: Curva OTDR do Cenário 3.

#### 5.1.4 Cenário com perda no 30º km

Neste cenário foi introduzida uma atenuação de 1 dB no quilômetro 30 do enlace. Na Figura 5.5, verifica-se uma queda que corresponde ao evento configurado e também a queda proveniente da perda pelos componentes no trecho em que há divisão do enlace para os 32 usuários, totalizando uma queda de 1,8 dB.

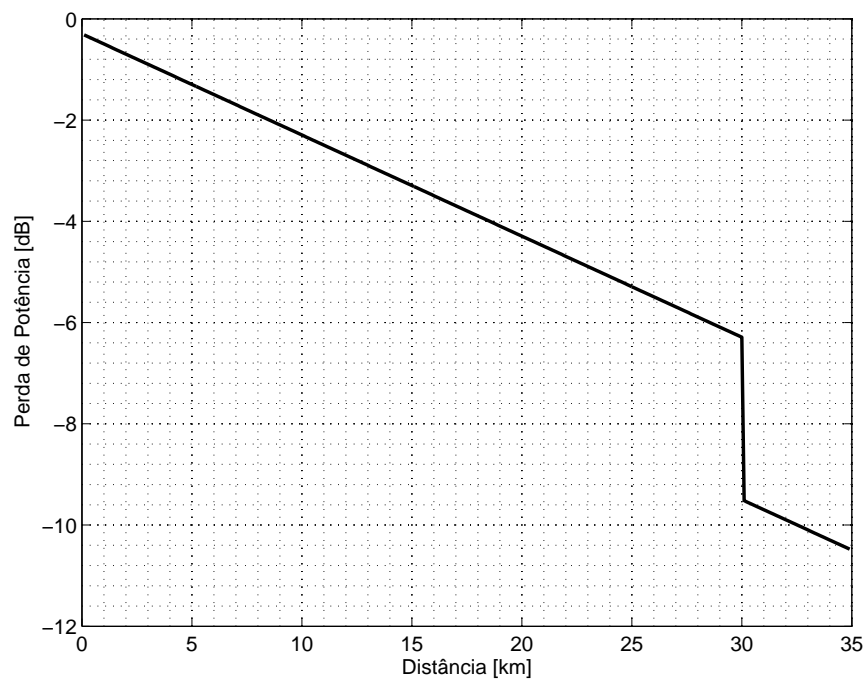


Figura 5.5: Curva OTDR do Cenário 4.

### 5.1.5 Cenário com perda no 6º e 27º km

Neste cenário foi introduzida uma atenuação de 1 dB no quilômetro 6 e 27 do enlace. Na Figura 5.6, verifica-se as duas quedas que correspondem aos eventos configurados e também a queda proveniente da perda pelos componentes no trecho em que há divisão do enlace para os 32 usuários.

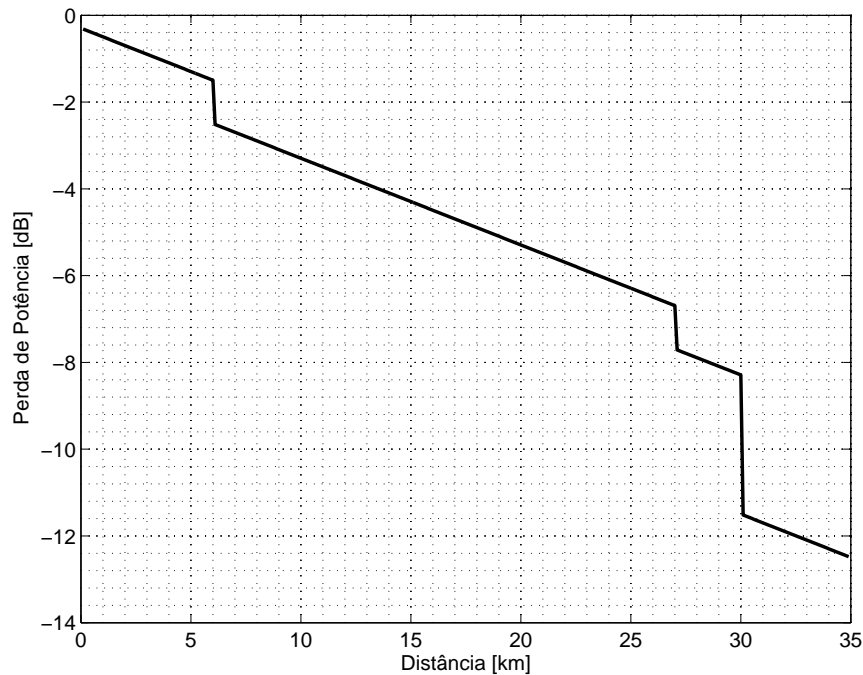


Figura 5.6: Curva OTDR do Cenário 5.

### 5.1.6 Cenário com perda no 6º e 30º km

Neste cenário foi introduzida uma atenuação de 1 dB no quilômetro 6 e 30 do enlace. Na Figura 5.7, verifica-se as duas quedas que correspondem aos eventos configurados e também a queda proveniente da perda pelos componentes no trecho em que há divisão do enlace para os 32 usuários.

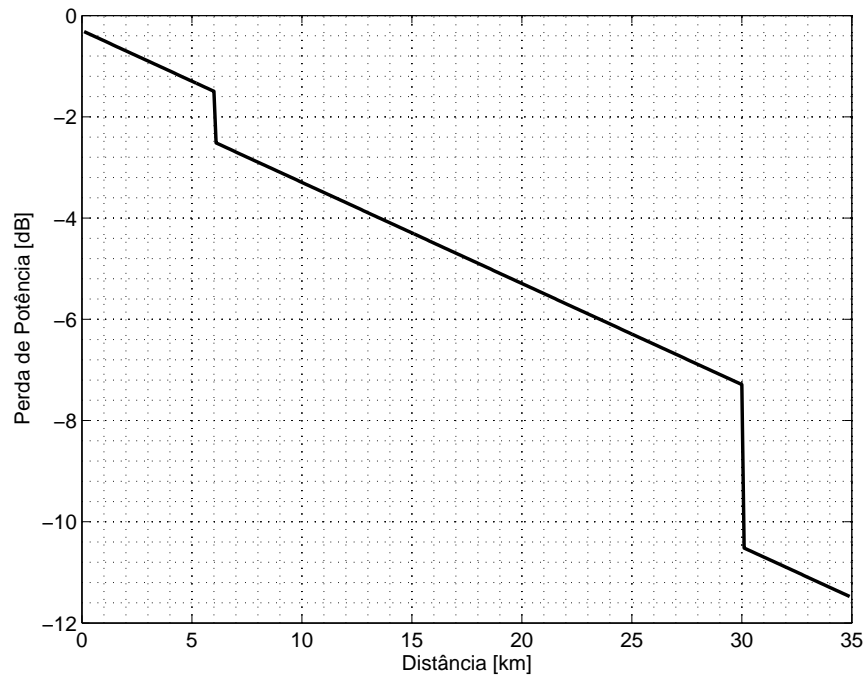


Figura 5.7: Curva OTDR do Cenário 6.

### 5.1.7 Cenário com perda no 6º, 27º e 30º km

Neste cenário foi introduzida uma atenuação de 1 dB no quilômetro 6, 27 e 30 do enlace. Na Figura 5.8, verifica-se as três quedas de que correspondem aos eventos configurados e também a queda proveniente da perda pelos componentes no trecho em que há divisão do enlace para os 32 usuários.

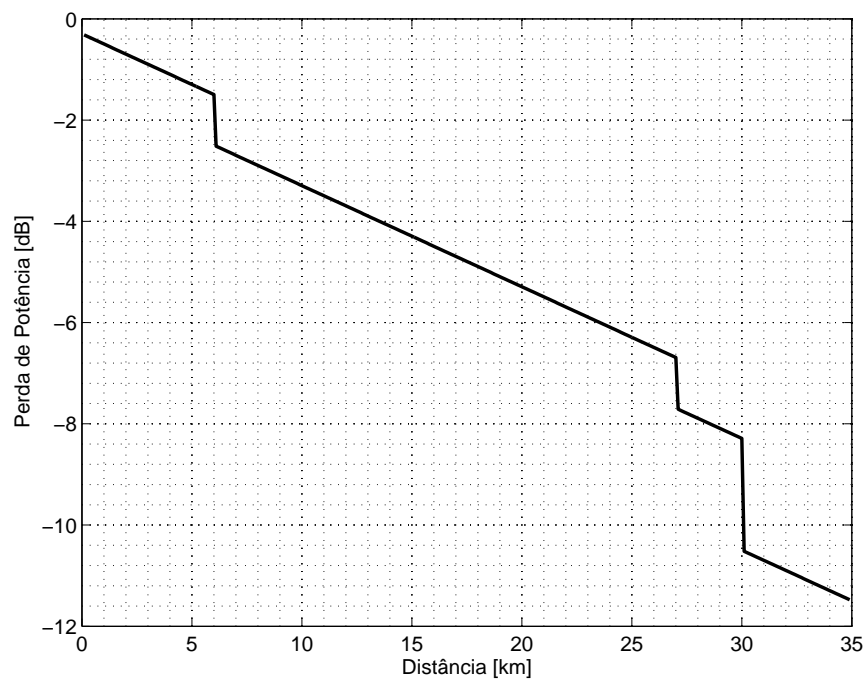


Figura 5.8: Curva OTDR do Cenário 7.

# Capítulo 6

## Conclusão

### 6.1 Considerações finais

Neste trabalho foi dada ênfase ao estudo, modelagem e monitoramento de redes ópticas passivas que usam a tecnologia WDM. Além disso, foram abordados os parâmetros relacionados à técnica de monitoramento por OTDR.

O estudo realizado sobre o comportamento do OTDR e a modelagem da rede, proporcionou embasamento para explorar os tipos de caracterização que podem ser obtidos por monitoramento de redes. O software usado para simular a rede foi escolhido em função da sua robustez, documentação e o fato de estar cada vez mais sendo usado em centros de pesquisa na área de redes ópticas. Os *scripts* utilizados foram desenvolvidos em *Matlab* pela familiarização já existente com a ferramenta e compatibilidade com software de simulação.

Foi possível alcançar o resultado desejado obtendo as curvas referentes aos cenários criados. As perdas relacionadas aos componentes da rede foram exploradas de forma significativa durante a modelagem da rede, mesmo que não tenham sido abordados seus efeitos refletivos.

### 6.2 Trabalhos futuros

Partindo da premissa que nenhum trabalho de engenharia está verdadeiramente concluído, uma vez que sempre é possível otimizá-lo, reestruturá-lo ou até fazer de forma diferente. Para futuras pesquisas, outras técnicas de monitoramento poderiam ser utilizadas, como por exemplo, OFDR [35]. Além disso, uma aplicação experimental da rede modelada seria de grande utilidade para averiguar os pontos divergentes entre a simulação e o experimento, tendo em vista melhorar o detalhamento da rede simulada.

# Referências Bibliográficas

- [1] Teleco. *Acompanhe a evolução do FTTx*. Disponível em <http://www.teleco.com.br/ftth.asp>. Acesso em 16/01/2013 às 22:00 horas.
- [2] Min Cen. *Study of Supervision of Wavelength Division Multiplexing Passive Optical Networks systems*. Master's thesis, KTH Information and Communication Technology, 2011.
- [3] Gerd Keiser. *Optical Communication Essentials*. McGraw-Hill Companies, 2004.
- [4] Mohammed M. Rad, Kerin Fouli, Habib A. Fathallah, Leslie A. Rush, and Martin Maier. Passive optical network monitoring: Challenges and Requirements. *IEEE Communications Magazine*, fevereiro 2011.
- [5] P.J. Urban, and S. Dahlfors. Cost-efficient remote PON monitoring based on OTDR measurement and OTM functionality. *Transparent Optical Networks (ICTON) 2011, 13th International Conference on*, páginas 1–4, junho 2011.
- [6] M. Wulpart, A. Grillet, K. Yuksel, D. Gianone, G. Ravet, and P. Mégret. Dynamics enhancement of OTDR-based monitoring systems for passive optical network. *Proceedings Symposium IEEE/LEOS Benelux Chapter*, 2007.
- [7] M. Wulpart, G. Ravet, P. Mégret, and M. Blondel. Distributed measurement of Raman gain spectrum in concatenations of optical fibres with OTDR. *Electronics Letters*, 39:88–89, 2003.
- [8] G. Ravet, F. Vanholsbeeck, M. Wulpart, A. Fotiadi, S. Coen, P. Emplit, M. Blondel, and P. Megret. Distributed measurement of nonlinear interactions in WDM systems. *Proceedings Symposium IEEE/LEOS Benelux Chapter*, páginas 245–248, 2003.
- [9] Nicola Ferrari, Laura Greborio, Francesco Montalti, Paola Regio, and Gaetano Vespasiano. OTDR characteristics for PON measurements. *Proceedings of the 57th IWCS*, 2008.

- [10] K. Yuksel, S. Dupont, D. Hamoir, and J.C. Froidure. FTTx automated test solution: Requirements and experimental implementation. *Electronics Letters*, 41, 2005.
- [11] T. Kurashima, M. Tateda, T. Horiguchi, and Y. Koyamada. Performance improvement of a combined OTDR for distributed strain and loss measurement by randomizing the reference light polarization state. *IEEE Photonics Technology Letters*, 9:360–362, 1997.
- [12] VPI Photonics. *VPITransmissionMaker Optical Systems*. Disponível em [www.vpi Photonics.com/TMOpticalSystems](http://www.vpi Photonics.com/TMOpticalSystems). Acesso em 21/12/2012 às 14:00 horas.
- [13] Optiwave. *Optical Communication System Design*. Disponível em [www.optiwave.com/products/system\\_overview](http://www.optiwave.com/products/system_overview). Acesso em 12/01/2013 às 15:00 horas.
- [14] Agerekibre Getaneh. *OTDR based WDM PON Monitoring*. Master's thesis, KTH Information and Communication Technology, 2012.
- [15] André Richter, Hadrien Louchet, and Igor Koltchanov. Design of optical access systems using computer modeling. *Journal of Communications*, volume 2, páginas 39–44, 2007.
- [16] Rajiv Ramaswami, Kumar N. Sivarajan, and Galen H. Sasaki. *Optical Networks: a Practical Perspective*. Morgan Kaufman: Elsevier Inc., 2010.
- [17] J. Lafarrière, G. Lietaert, R. Taws, and S. Wolszczak. *Reference Guide to Fiber Optic Testing*, volume 1. JDS Uniphase Corporation, 2<sup>a</sup> edição, 2011.
- [18] Gerd Keiser. *FTTx Concepts and Applications*. Wiley Interscience, 2006.
- [19] Cedric F. Lam. *Passive Optical Networks: Principles and Practice*. Academic Press, 2011.
- [20] Gerd Keiser. *Optical Fiber Communications*. McGraw-Hill Companies, 2000.
- [21] Achyut Dutta, Niloy K. Dutta, and Masashiko Fujiwara. *WDM Technologies*, volume 3. Elsevier Academic Press, 2004.
- [22] CPqD. *Capacidade, velocidade e inteligência ditam a evolução das redes ópticas*. Disponível em [www.cpqd.com.br](http://www.cpqd.com.br). Acesso em 05/01/2013 às 19:00 horas.

- [23] Fu tai An, Kyeong Soo Kim, Yu li Hsueh, Matthew Rogge, Wei tao Shaw, and Leonid Kazovsky. Evolution, challenges and enabling technologies for future WDM-based optical access networks. *Proc. of JCIS 2003, Research Triangle Park, NC, USA*, páginas 1449–1453, 2003.
- [24] Wikipedia. *Arrayed Waveguide Grating*. Disponível em [en.wikipedia.org/wiki/Arrayed\\_waveguide\\_grating](http://en.wikipedia.org/wiki/Arrayed_waveguide_grating). Acesso em 02/01/2013 às 15:30 horas.
- [25] Govind P. Agrawal. *Fiber-Optic Communication Systems*. John Wiley & Sons, Inc., 3<sup>a</sup> edição, 2002.
- [26] D. Pator P. Munoz, and J. Capmany. *Modeling and design of arrayed waveguide gratings*. *Journal of Lightwave Technology*, 20:661, 2002.
- [27] VPI Photonics. *VPI TransmissionMaker Optical Systems User's Manual*, 2012.
- [28] A. E. N. A. Mohammed, A. N. Z. Rashed e A. E. F. A. Saad. Estimated optimization parameters of arrayed waveguide gratings for C-band applications. *International Journal of Physical Sciences*, 4:149–155, 2009.
- [29] Kivilcim Yuksel, Véronique Moeyaert, Marc Wuilpart e Patrice Mégret. Optical Layer Monitoring in Passive Optical Network: A Review. *ICTON*, Tu.B1.1:pag. 92–98, 2008.
- [30] M. Born e E. Wolf. *Principles of Optics*. Wiley, New York, 7<sup>a</sup> edição, 1999.
- [31] Paul A. Tipler. *Física para cientistas e engenheiros*, volume 2. LTC, 2000.
- [32] André L. da Rocha Abbade e Maria R. C. Caputo. *Aplicação do OTDR na análise de problemas de atenuação em Fibras Ópticas: Estudo de casos*, dezembro 2002.
- [33] Hewlett-Packard. *Usando um Reflectômetro Óptico (OTDR) para diagnosticar falhas na rede óptica*, 1994.
- [34] Agilent Technologies. *Optical Time Domain Reflectometers*, 2001.
- [35] M. Wegmuller, P. Oberson, J.P. von der Weid, O. Guinnard, L. Guinnard, C. Vinegoni, M. Legré, and N. Gisin. Overview of coherent reflectometry techniques: characterization of components and small systems. *Technical Digest Symposium on Optical Fiber Measurements*, páginas 155–160, 2000.

# Apêndice A

## Códigos Matlab para Cossimulação

### Coleta da potência de Entrada

```
function PotEntrada(input)
fid = fopen('potEntrada.csv','a');
fprintf(fid,'%f;',input);
fclose(fid);
end
```

### Coleta do primeiro trecho de enlace

```
function otdr1(input1)
fid = fopen('input1.csv','a');
fprintf(fid,'%f;',input1);
fclose(fid);
end
```

### Coleta do segundo trecho de enlace

```
function otdr2(input2)
fid = fopen('input2.csv','a');
fprintf(fid,'%f;',input2);
fclose(fid);
end
```



### Coleta do terceiro trecho de enlace

```
function otdr3(input3)
fid = fopen('input3.csv','a');
fprintf(fid,'%f;',input3);
fclose(fid);
end
```

### Coleta do quarto trecho de enlace

```
function otdr4(input4)
fid = fopen('input4.csv','a');
fprintf(fid,'%f;',input4);
fclose(fid);
```

%% Coleta a transposta da matriz

```
PotEntrada = load('potEntrada.csv');
```

```
sinal1 = load('input1.csv');
```

```
sinal2 = load('input2.csv');
```

```
sinal3 = load('input3.csv');
```

```
sinal4 = load('input4.csv');
```

```
sinal = [sinal1;sinal2;sinal3;sinal4]; % Concatena os 3 sinais refletidos
```

```
tamVetor = length(sinal);
```

```
Pin = PotEntrada*(ones(tamVetor,1));
```

```
DistKm = (100/1000)*(1:tamVetor); % Conversao para Km
```

```
OTDR = sinal-Pin;
```

```
plot(DistKm,OTDR,'-r','LineWidth',2),grid minor
```

```
set(gca,'fontsize',12);
```

```
xlabel('Distância [km]','fontsize',12);
```

```
ylabel('Perda de Potência [dB]','fontsize',12);
```

```
title('Traço OTDR','fontsize',12);
```

```
saveas(gcf,'OTDR','eps');
```

```
saveas(gcf,'OTDR','fig');
```

```
end
```