

Deividi Longaretti

# **Otimização Técnica do Enlace Óptico Entre os Diversos Campi da UNIPAMPA**

Alegrete, RS

10 de julho de 2017



Deividi Longaretti

# Otimização Técnica do Enlace Óptico Entre os Diversos Campi da UNIPAMPA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia de Telecomunicações, Área de Concentração em Comunicações Ópticas, da Universidade Federal do Pampa (Unipampa, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de **Bacharel em Engenharia de Telecomunicações**.

Universidade Federal do Pampa – Unipampa

Curso de Engenharia de Telecomunicações

Orientador: Dr. Djeisson Hoffmann Thomas

Alegrete, RS

10 de julho de 2017

Ficha catalográfica elaborada automaticamente com os dados fornecidos  
pelo(a) autor(a) através do Módulo de Biblioteca do  
Sistema GURI (Gestão Unificada de Recursos Institucionais) .

L849o Longaretti, Deividi  
Otimização técnica do enlace óptico entre os diversos campi  
da UNIPAMPA / Deividi Longaretti.  
67 p.

Tese(Doutorado)-- Universidade Federal do Pampa, ENGENHARIA  
DE TELECOMUNICAÇÕES, 2017.

"Orientação: Djeisson Thomas".

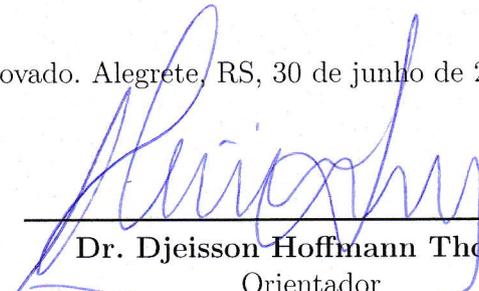
1. Telecomunicações. 2. Comunicações Óptica. 3. Redes  
Ópticas. 4. Fibra Óptica. I. Título.

Deividi Longaretti

## Otimização Técnica do Enlace Óptico Entre os Diversos Campi da UNIPAMPA

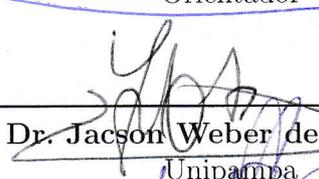
Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia de Telecomunicações, Área de Concentração em Comunicações Ópticas, da Universidade Federal do Pampa (Unipampa, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de **Bacharel em Engenharia de Telecomunicações**.

Trabalho aprovado. Alegrete, RS, 30 de junho de 2017:



---

Dr. Djeisson Hoffmann Thomas  
Orientador



---

Dr. Jacson Weber de Menezes  
Unipampa



---

Dr. Marcos V. T. Heckler  
Unipampa

Alegrete, RS  
30 de junho de 2017



Dedico este trabalho aos meus pais,  
meus maiores exemplos, Vilmar e Sandra.



# Agradecimentos

- Agradeço primeiramente aos meus pais, Vilmar e Sandra, e toda minha família, por todo incentivo e apoio, sem eles nada disso seria possível.
- Agradeço imensamente à minha namorada, Sabrina, a qual eu amo muito. Que esteve ao meu lado durante todo esse tempo, com palavras de carinho e apoio me ajudou muito. Obrigado por me aguentar nos dias de tensão pré prova, e também enfrentar junto comigo a saudade durante todo esse tempo.
- Também agradeço muito meu orientador, Professor Dr. Djeisson Hoffmann Thomas, que fez com que eu admirasse ainda mais esta área, pelos ensinamentos passados ao longo deste trabalho e também por toda a ajuda durante a execução deste trabalho, horas de conversa, reuniões, e-mails, enfim, muito obrigado.
- Meus mais sinceros agradecimentos também ao Professor Dr. Jacson Weber de Menezes, por toda ajuda ao longo deste período de faculdade, que além de professor se tornou um grande amigo e foi o responsável pelo meu encanto pela área da óptica.
- Agradeço também o meu amigo Mateus Oliveira pelo seu companheirismo nesta jornada, dividindo as dificuldades enfrentadas e alegrias obtidas.



*“Nesta jornada terrena aprende muito quem anda.  
Sempre que a alma “se agranda” a estrada fica pequena”.*  
*(Jayme Caetano Braun)*



# Resumo

A fibra óptica apresenta características que favorecem a propagação de sinais eletromagnéticos de um ponto a outro, quando comparada a outros guias de onda. O desempenho máximo da fibra óptica enquanto guia de onda depende da escolha apropriada da topologia de rede, tanto em seu aspecto físico quanto lógico. Na medida em que topologias de rede mais eficientes são apresentadas, abrem-se possibilidades de melhorias para os enlaces já instalados. Após estudo e avaliação técnica criteriosa das características de tráfego da rede, é possível verificar se a topologia física utilizada é a mais indicada e propor alterações que conduzirão à melhoria do desempenho de comunicação. Neste contexto, este trabalho apresenta importantes avanços técnicos para a interconexão dos diversos campi da Universidade Federal do Pampa (UNIPAMPA). Estes avanços podem ser alcançados através da adoção da topologia física mais apropriada a interligar os dez campi da instituição, situados ao longo da fronteira oeste do Rio Grande do Sul, além da reitoria, distribuída em dois endereços na cidade de Bagé. A topologia proposta é do tipo malha e é avaliada em termos orçamento de potência (alcance do sinal), orçamento de tempo (sensibilidade à dispersão) e de custo. Os custos referentes aos componentes da camada física são examinados para três diferentes propostas. A rede proposta ostenta vantagens como uma maior robustez à falhas devido a rompimentos ou ao congestionamento da rede, também permite oferecer uma maior qualidade de serviço em função da redução da latência na rede, ou seja, da redução do tempo necessário à comunicação. Este trabalho poderá ser utilizado para o embasamento técnico, auxiliando em decisões para futuras evoluções na infraestrutura óptica da UNIPAMPA.

**Palavras-chave:** Telecomunicações. Comunicações ópticas. Redes ópticas. Fibra óptica. Topologia de rede.



# Abstract

The optical fiber has characteristics which favor the propagation of electromagnetic signals from one point to another, when compared to other waveguides. The maximum performance of optical fiber as a waveguide depends on the appropriate choice of the network topology, both in its physical and logical aspects. The development of more efficient network topologies allows the possibility for improvements of already installed links. After a careful study and technical assessment of network traffic characteristics, it is possible to verify if the physical topology used is the most appropriate and to propose changes that will lead to improved communication performance. In this context, this work presents important technical advances for the interconnection of the various campuses of the Federal University of Pampa (UNIPAMPA). These advances can be achieved through the adoption of the most appropriate physical topology to link the ten campuses of the institution located along the west border of Rio Grande do Sul, as well as the rectory, distributed in two addresses in the Bagé city. The proposed topology is of mesh type and is evaluated in terms of power budget (signal range), time budget (dispersion sensitivity) and cost budget. The proposed network has advantages such as greater robustness to failures due to disruptions or network congestion, and a greater quality of service due to the reduction of the latency in the network, i.e., the reduction of the time needed to establish the communication. This work can be used as a theoretical background, to help in decisions for future expansions in the optical infrastructure of UNIPAMPA.

**Key-words:** Telecommunications. Optical communications. Optical networks. Optical fiber. Network topology.



# Lista de ilustrações

|   |    |
|---|----|
| Figura 1 – Representação das terminologias de redes ópticas, para o caso da UNIPAMPA. . . . .   | 25 |
| Figura 2 – Topologia de rede do tipo barramento linear. . . . .   | 26 |
| Figura 3 – Topologia de rede em anel. . . . .   | 26 |
| Figura 4 – Topologia de rede em estrela. . . . .  | 27 |
| Figura 5 – Topologia de rede em malha. . . . .  | 28 |
| Figura 6 – Topologia de referência apresentada por Maesschalck et al.(MAESSCHALCK et al., 2003) . . . . .                             | 29 |
| Figura 7 – Feixe de luz incidente em uma interface entre dois materiais com índices de refração distintos, onde $n_1 > n_2$ . . . . . | 31 |
| Figura 8 – Modos de propagação adentrando em uma fibra. . . . .   | 36 |
| Figura 9 – Mapa topológico da rede óptica existente entre os diversos campi da UNIPAMPA. . . . .                                      | 39 |
| Figura 10 – Mapa topológico das conexões lógicas da rede óptica entre os diversos campi da UNIPAMPA. . . . .                          | 40 |
| Figura 11 – Mapa topológico da instalação dos cabos ópticos. . . . .  | 42 |
| Figura 12 – Gráfico do comprimento da fibra (L) versus a potencia total disponível(PT). . . . .                                       | 44 |
| Figura 13 – Encapsulamento padrão de um transceptor (INC., 2017). . . . .   | 48 |
| Figura 14 – Esquemático dos componentes empregados entre dois nós consecutivos no cenário da rede proposta. . . . .                   | 49 |



# Lista de tabelas

|   |    |
|---|----|
| Tabela 1 – Caminhos de fibra óptica com suas respectivas distâncias, considerando uma margem de segurança de cabo de 10 m para cada 1 km. . . . . | 41 |
| Tabela 2 – Taxas de dados disponibilizada pela rede atual para cada campus da UNIPAMPA. . . . .   | 42 |
| Tabela 3 – Orçamento de potência exigida para cada enlace da rede. . . . .  | 45 |
| Tabela 4 – Requisitos de potência dos dispositivos para cada caminho. . . . .   | 50 |
| Tabela 5 – Componentes escolhidos com suas respectivas potências para a proposta não otimizada. . . . .   | 51 |
| Tabela 6 – Levantamento de custos com componentes para a proposta não otimizada.  | 51 |
| Tabela 7 – Componentes escolhidos com suas respectivas potências para a proposta otimizada. . . . .   | 52 |
| Tabela 8 – Levantamento de custos com componentes para a proposta otimizada.  | 52 |
| Tabela 9 – Componentes escolhidos com suas respectivas potências para a terceira abordagem do projeto, a contraproposta otimizada. . . . .        | 53 |
| Tabela 10 – Levantamento de custos com componentes para a contraproposta otimizada. . . . .   | 53 |
| Tabela 11 – Levantamento de custos de cabos ópticos provenientes de três fabricantes distintas. . . . .   | 54 |
| Tabela 12 – Custo referente aos componentes da camada física da rede proposta, para a UNIPAMPA. . . . .   | 55 |
| Tabela 13 – Lista de transceptores utilizados. . . . .  | 65 |
| Tabela 14 – Lista de amplificadores EDFA utilizados. . . . .  | 65 |
| Tabela 15 – Lista de fibras ópticas orçadas. . . . .  | 65 |



# Sumário

|          |   |           |
|----------|---|-----------|
| <b>1</b> | <b>Introdução</b>                                       | <b>21</b> |
| 1.1      | Objetivos   | 22        |
| 1.2      | Metodologia   | 23        |
| <b>2</b> | <b>Revisão Bibliográfica</b>                            | <b>25</b> |
| 2.1      | Topologias de Redes Ópticas                             | 25        |
| 2.1.1    | Barramento linear                                       | 25        |
| 2.1.2    | Anel  | 26        |
| 2.1.3    | Estrela   | 27        |
| 2.1.4    | Malha   | 27        |
| 2.2      | Estudo de caso: rede óptica Pan-Europeia                | 28        |
| 2.3      | Fundamentação Teórica                                   | 30        |
| 2.3.1    | Fibra óptica  | 30        |
| 2.3.2    | Fonte   | 32        |
| 2.3.3    | Detector  | 33        |
| 2.3.4    | Amplificador  | 34        |
| 2.3.5    | Conectores e Emendas                                    | 34        |
| 2.3.6    | Tecnologia WDM  | 35        |
| 2.3.7    | Penalidades de potência                                 | 35        |
| <b>3</b> | <b>Otimização dos Enlaces Ópticos da UNIPAMPA</b>       | <b>39</b> |
| 3.1      | Desenvolvimento Prático                                 | 39        |
| 3.1.1    | Balanco de Potência                                     | 43        |
| 3.1.2    | Balanco de Tempo de Subida                              | 45        |
| 3.1.3    | Especificação dos Componentes e Levantamento dos Custos | 47        |
| 3.2      | Análise de Resultados                                   | 54        |
| <b>4</b> | <b>Conclusão</b>  | <b>59</b> |
|          | <b>Referências</b>                                      | <b>61</b> |
|          | <b>Anexos</b>   | <b>63</b> |



# 1 Introdução

Comunicação de banda larga, sob altas taxas de dados, de elevada confiabilidade por longas distâncias sempre foi o grande objetivo de todos os sistemas de comunicações. O principal estímulo para o estudo de novas tecnologias vem do aumento da demanda por banda larga em função de serviços como transmissão P2P (do inglês *Peer-to-Peer*), transmissão de vídeo, videoconferência, jogos online e a utilização maciça de redes sociais. Neste contexto, dentre os diversos sistemas de comunicações disponíveis, os sistemas ópticos vêm apresentando grande destaque. Este interesse é consequência, principalmente, da alta capacidade de transmissão aliada às baixas perdas da fibra óptica como guia de onda (KEISER, 2014).

As comunicações via fibra óptica foram apresentadas no ano de 1966, onde os engenheiros de pesquisa Charles Kao e George Hockham publicaram um documento chamado “*Dielectric-fibre surface waveguides for optical frequencies*” (KAO; HOCKHAM, 1986), que desencadeou todo o campo de comunicações baseadas em fibra óptica. Posteriormente esta publicação rendeu para Charles Kao parte do Prêmio Nobel da Física em 2009 (HECHT, 2016). Esta importante descoberta fez com que, na década de 90, vários pesquisadores se dedicassem a desenvolver e avaliar topologias físicas e lógicas para redes ópticas, de modo a poder explorar de maneira integral as qualidades oferecidas por este guia de ondas (MARTINI, 1999) (BANNISTER L. FRATTA, 1990) (BRACKETT et al., 1993)(MUKHERJEE et al., 1996).

A possibilidade de transmissão a longas distâncias reduz a quantidade de repetidores ao longo do enlace e, por conseguinte, o custo e a complexidade do sistema. Cabe mencionar, ainda, que por ser composta de um material dielétrico, a fibra óptica é imune a interferências eletromagnéticas, o que permite a instalação junto à rede elétrica, por exemplo, sem gerar e nem sofrer interferências. Ainda, seu pequeno peso e tamanho facilitam a instalação, reduzindo custos de implantação (KEISER, 2014).

Para que seu grande potencial seja bem explorado, a otimização de desempenho das redes ópticas é imprescindível. Um parâmetro importante a ser discutido em projetos ópticos é a topologia da rede. Um trabalho neste sentido foi feito por Maesschalck et al.(MAESSCHALCK et al., 2003) levando em conta caminhos alternativos para os dados, onde efetuou um estudo em termos de custo de projeto e disponibilidade de conexão para a rede óptica pan-Europeia. Simuladores computacionais podem ser empregados no projeto e otimização das redes ópticas, os quais permitem estimar os resultados a serem alcançados (ARAÚJO, 2015). Ainda, podem ser utilizados programas que realizam otimizações baseadas em algoritmos de colônia (LETIĆ; AVDAGIC; BOŠKOVIC, 2015).

Efetuar o projeto utilizando uma topologia de rede que garanta a conectividade perante à falhas é uma questão de investimento em qualidade de serviço. Neste contexto, para atender os crescentes requisitos de comunicação entre os diversos campi da Universidade Federal do Pampa (UNIPAMPA), propõe-se uma modificação na estrutura da rede óptica da instituição, através da escolha da topologia física que melhor se adeque à mesma. Além da especificação da melhor topologia a ser utilizada são especificados os componentes a serem utilizados na mesma, apresentando três diferentes abordagens em relação aos componentes. Os diversos campi encontram-se dispostos ao longo de toda a Fronteira Oeste do Rio Grande do Sul e somam-se em um total de dez unidades, além da reitoria, dividida em duas sedes e localizada na cidade de Bagé.

A topologia sugerida neste trabalho é do tipo malha, a qual, além de outros benefícios que serão discutidos a seguir, garante caminhos alternativos em caso de falhas, ocorridas em função do rompimento da fibra ou do congestionamento do tráfego da rede (KEISER, 2014). Esta nova proposta de rede originou-se em decorrência de que, atualmente, a topologia de rede que fornece a conexão entre os campi da UNIPAMPA é do tipo estrela e neste tipo de topologia o rompimento de uma fibra ao longo de um caminho acarretará em impossibilidade de comunicação. De forma análoga, a sobrecarga em um nó pode deixar lenta a comunicação a ponto de impossibilitar a execução de atividades desejadas. Considerando a estrutura multicampi adotada pela instituição, a utilização de serviços de teleconferência entre os dez campi e a reitoria vem aumentando consideravelmente, sendo esta uma das motivações para a expansão da rede óptica da UNIPAMPA.

Desta forma, a adoção de uma topologia alternativa de rede para a interligação óptica entre os diversos campi proposta neste trabalho permite uma comunicação mais eficiente (comunicação direta entre nós), mais robusta a falhas e mais econômica quanto aos serviços contratados. Esta proposta pode servir como base para futuras melhorias na rede óptica existente na instituição.

## 1.1 Objetivos

O principal objetivo deste trabalho é propor importantes avanços técnicos para interconexão dos diversos campi da UNIPAMPA a um custo competitivo. Objetivo este que passa pela escolha da topologia de rede mais apropriada à característica de tráfego da instituição, especificação dos componentes e comprovação da viabilidade financeira para a implantação da rede proposta.

O secesso do objetivo principal é diretamente ligado a execução dos objetivos postos abaixo:

- Atender os requisitos crescentes de demanda por comunicação dos diversos campi da

UNIPAMPA;

- Disponibilizar caminhos alternativos para o sinal em caso de sobrecarga ou rompimento de um caminho;
- Possibilitar uma comunicação direta entre dois nós consecutivos da rede, sem necessidade de passar por um nó central;
- Efetuar o balanço de tempo e potência do enlace projetado;
- Efetuar o projeto empregando equipamentos de baixo custo, atendendo requisitos mínimos de desempenho;

## 1.2 Metodologia

Para a realização deste trabalho, foram levantadas a topologia da rede óptica existente bem como a localização geográfica de cada campus da UNIPAMPA, incluindo as duas instalações da reitoria. Em posse destas características, foi associada à estrutura encontrada as topologias de redes existentes e definiu-se a melhor topologia para a rede da instituição. Para o desenvolvimento do projeto da rede, foi considerado o custo de implantação de cada caminho, analisando sua relevância ao enlace como um todo, podendo assim tomar decisões quanto à viabilidade do mesmo.

Uma vez feito o projeto da topologia, foi efetuado um balanço de tempo e potência para cada conexão, de modo a obter os requisitos de desempenho dos componentes que compõem a rede. Após a obtenção dos requisitos de desempenho, foi feita a escolha dos componentes da rede, tais como: o tipo de fibra óptica, amplificadores, fontes ópticas e receptores. A escolha dos componentes foi feita de forma a garantir o desempenho estabelecido com o menor custo para o sistema.

Por fim, foi feito um levantamento dos custos da rede proposta para que se possa avaliar a viabilidade de implantação da mesma quando comparado aos custos atualmente pagos pela instituição para acessar os serviços de comunicação pela via óptica.



## 2 Revisão Bibliográfica

Antecipadamente à apresentação dos conceitos teóricos, os quais estão embasados este trabalho, coloca-se as terminologias comumente utilizadas em redes ópticas, ilustradas para o cenário da UNIPAMPA na Figura 1. Rede óptica: infraestrutura física e lógica necessária à comunicação óptica entre os pontos desejados. Nó: origem e destino do tráfego da rede. Pontos de acesso do tráfego dos usuários à rede. Tronco: enlace óptico que agrega o tráfego de/para diversos nós ou redes. A topologia é forma com que os nós são ligados entre si, formando a rede. (KEISER, 2014)

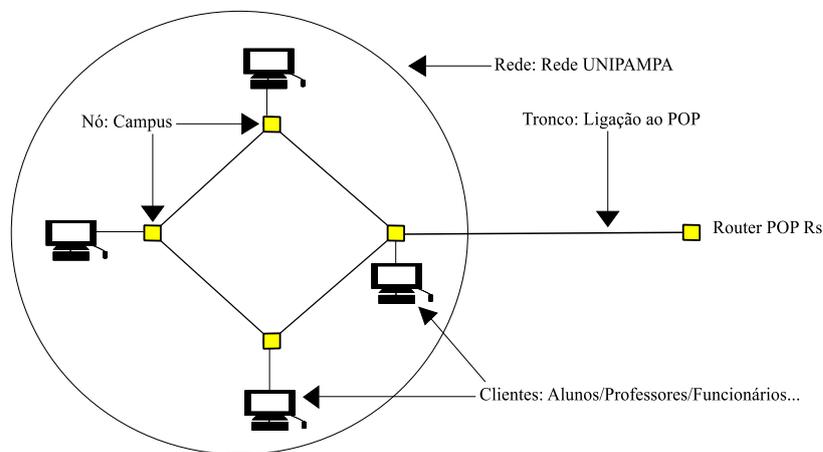


Fig. 1 – Representação das terminologias de redes ópticas, para o caso da UNIPAMPA.

### 2.1 Topologias de Redes Ópticas

Existem diversas topologias que podem ser utilizadas em redes ópticas, sendo que, cada uma possui características de capacidade, confiabilidade e escalabilidade distintas. A seguir, são apresentadas as características das topologias mais comumente utilizadas, salientando qualidades e deficiências das mesmas. Atualmente encontra-se na literatura uma vasta diversidade de topologias de rede óptica (NADA, a), sendo elas derivadas das topologias apresentadas a seguir.

#### 2.1.1 Barramento linear

O barramento linear é uma topologia que conecta os nós da rede de forma sequencial e, por sua simplicidade, apresenta baixo custo de implementação. Porém, se trata de uma rede desprovida de caminhos alternativos para o sinal, de maneira que, falhas ou sobrecargas

em qualquer nó ou caminho da rede acarretarão na interrupção da comunicação. A Figura 2 apresenta a disposição dos nós em uma rede com topologia de barramento linear.

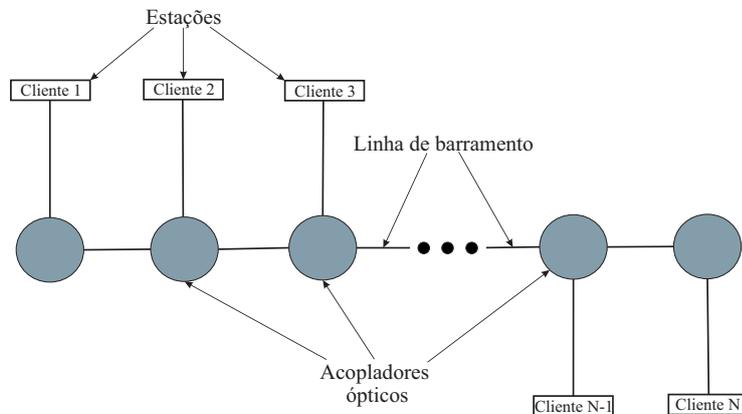


Fig. 2 – Topologia de rede do tipo barramento linear.

Neste tipo de topologia, a lentidão no processamento dos dados em qualquer nó da rede se alastra ao longo de todos os nós subsequentes, de forma que, problemas ocorridos em um nó são extremamente difíceis de isolar, afetando a rede como um todo (KEISER, 2014).

### 2.1.2 Anel

Na topologia em anel, os nós são conectados em série, formando um anel, conforme pode ser visto na Figura 3. Neste tipo de configuração, pode ser obtido um caminho alternativo para o sinal através de uma transmissão bidirecional. Desta forma, caso ocorra falha em um ponto do anel, a informação percorre o caminho inverso do anel até o destino.

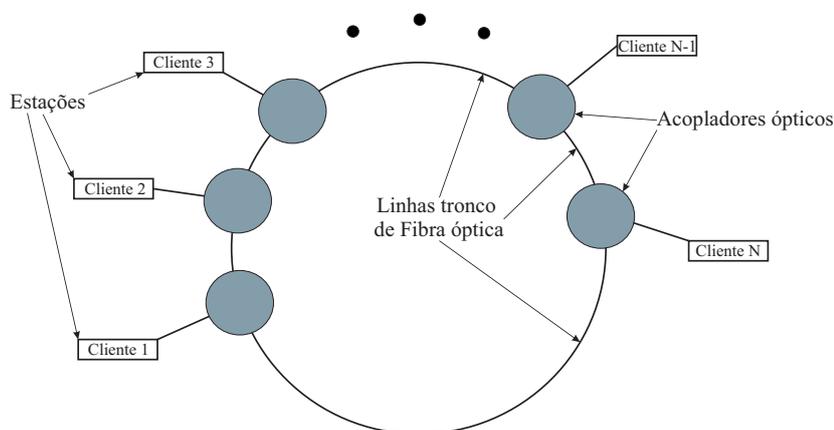


Fig. 3 – Topologia de rede em anel.

A topologia em anel é geralmente utilizada em redes com um baixo número de nós. Na medida em que o número de nós aumenta, esta topologia faz com que a comunicação fique lenta, em função do processamento em cada nó. Como alternativa de melhoria neste tipo de topologia, podem ser utilizadas tecnologias que eliminem o processamento do conteúdo em nós intermediários (KEISER, 2014).

### 2.1.3 Estrela

A topologia em estrela oferece simples adição e remoção de nós, sendo que cada nó é independente do outro. O gerenciamento do tráfego de toda a rede é feito no nó central, o que facilita o controle do tráfego, porém um gerenciamento centralizado pode fazer com que o nó central fique sobrecarregado. Uma falha ou sobrecarga no nó central acarreta na paralisação ou lentidão da comunicação de todos os nós. Uma representação da topologia em estrela pode ser observado na Figura 4.

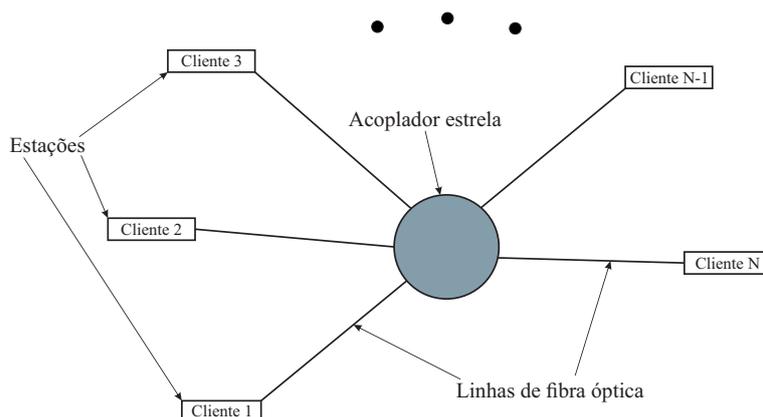


Fig. 4 – Topologia de rede em estrela.

A topologia em estrela não provê caminhos alternativos para o sinal, a falha em uma linha de fibra acarreta no ilhamento do nó que estava conectado por esta linha. O desempenho deste tipo de rede é diretamente proporcional à capacidade de gerenciamento do nó central. Na medida em que mais clientes são conectados à rede, maior deve ser a capacidade de processamento do nó central (KEISER, 2014).

### 2.1.4 Malha

A topologia em malha é estruturada de maneira em que os nós sejam conectados por, pelo menos, dois caminhos distintos. Isso agrega confiabilidade e disponibilidade de comunicação ao enlace, sendo que, em caso de falhas em uma linha de fibra, a comunicação pode ser estabelecida por outro caminho. Conforme pode ser observado na Figura 5, a descentralização dos recursos de processamento neste tipo de rede é uma característica

importante, sendo que, em caso de falha de um nó, este possa ser substituído sem gerar elevados custos.

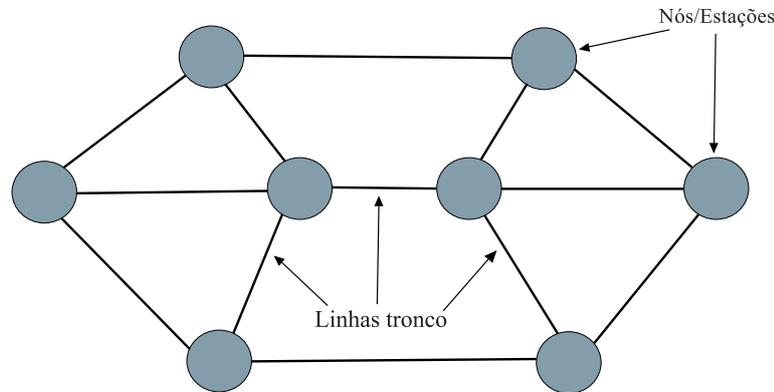


Fig. 5 – Topologia de rede em malha.

A rede em malha ainda provê benefícios em relação à possibilidade de comunicação direta entre nós vizinhos, o que torna a comunicação mais eficiente por não gerar tráfego em qualquer outro nó (KEISER, 2014).

## 2.2 Estudo de caso: rede óptica Pan-Europeia

Um planejamento de rede que leva em conta caminhos alternativos para os dados é apresentado por Maeschalck et al. (MAESSCHALCK et al., 2003), baseado na rede óptica Pan-Europeia. Este estudo apresenta como referência uma topologia do tipo malha, referenciada por ele como BT (do inglês, *Basic Topology*), composta por 28 nós localizados em diferentes cidades, conforme exposto na Figura 6.

A topologia BT apresenta 41 ligações entre nós, fornecendo para qualquer par de nós comunicantes um caminho alternativo para a comunicação.

Com base na topologia de referência, Maeschalck et al. propõem outras quatro topologias para a rede pan-Europeia, mantendo como característica predominante em todas suas propostas a existência de, pelo menos, duas ligações para cada nó. As topologias apresentadas por ele contém variações quanto ao número de nós e o número de ligações entre estes nós. No presente trabalho é analisado somente as topologias: RT (do inglês, *Ring Topology*) e TT (do inglês, *Triangular Topology*), além da topologia de referência BT. Além destas, outras duas topologias são propostas por (MAESSCHALCK et al., 2003), (*Large Topology - LT*) e (*Core Topology - CT*), que abrangem diferentes áreas geográficas, o que implica em uma alteração quanto ao número de nós da rede, de modo que a comparação com a topologia de referência não é apropriada.

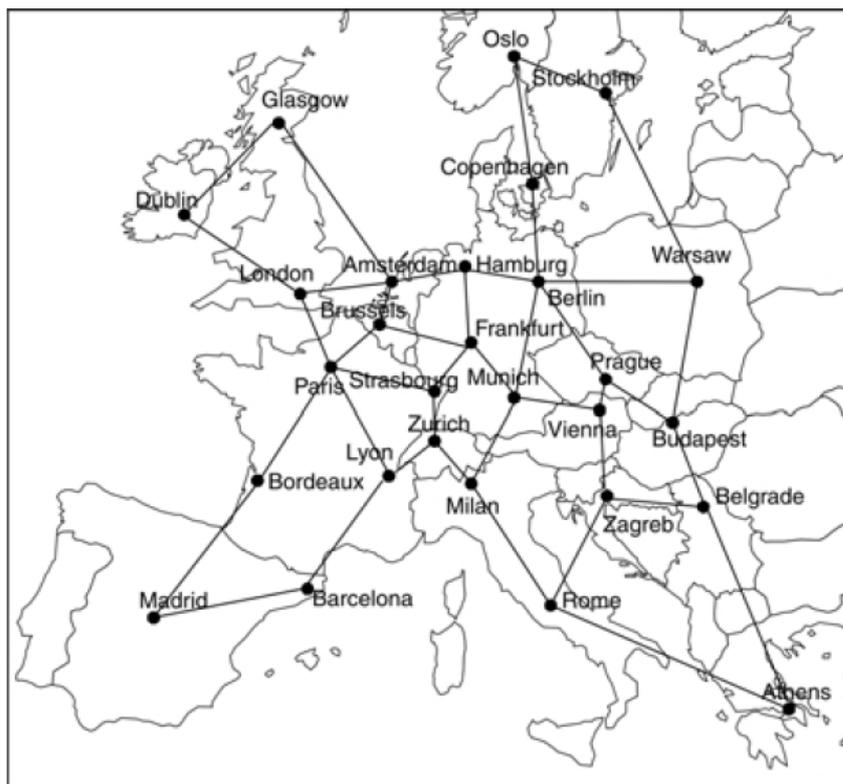


Fig. 6 – Topologia de referência apresentada por Maeschalck et al. (MAESSCHALCK et al., 2003)

A topologia RT difere da BT pelo número de ligações entre nós, reduzindo para 34. Esta topologia torna a rede mais simples e menos custosa de ser implementada, sem deixar de possuir caminhos de segurança para o caso de falhas. Porém, como o grau de conectividade dos nós diminuiu, convém ressaltar um aumento quanto ao tráfego em cada nó quando comparado à BT, demandando de maiores recursos de processamento nos mesmos. Apesar de ser denominada topologia em anel (*Ring Topology*), vale ressaltar que não se trata de uma topologia anel pura, e sim, uma variação que mescla a topologia em anel e malha.

A terceira topologia analisada é a TT, sendo a que apresenta a maior conectividade quando comparada às demais. A característica principal desta topologia é apresentar ligações triangulares (ou seja, a cada três nós da rede), totalizando 61 conexões entre os 28 nós. A topologia TT apresenta uma alta conectividade entre nós, fato este que torna muito robusta quanto a falhas. Contudo, devido ao grande número de ligações entre nós, esta topologia apresenta o maior custo de implantação.

O custo de implementação das topologias, BT, RT e TT foi avaliado em (MAESSCHALCK et al., 2003) sob as mesmas condições de tráfego e considerando dois cenários, o primeiro onde se contrata um provedor de serviços de telecomunicações para fornecer a capacidade desejada, e o segundo considerando a implantação de uma rede própria. Os

resultados expostos pelos autores mostram que, para a construção de uma rede própria a topologia em anel é a mais em conta financeiramente, enquanto que para a contratação de um provedor, para fornecer a mesma taxa de dados, a topologia triangular é a mais aconselhada.

Outra forma de avaliar e otimizar redes ópticas se dá através de métodos baseados em conceitos de Ciência de Redes e em Algoritmos Evolucionários, os quais utilizam simuladores para analisar e gerar seus resultados (ARAÚJO, 2015). Também podem ser utilizadas otimizações baseadas em algoritmos de colônia (LETIĆ; AVDAGIC; BOŠKOVIC, 2015). Porém, o cenário da rede da UNIPAMPA apresenta situações específicas quanto à instalação dos cabos de fibras ópticas, contendo restrições em relação aos caminhos entre nós. Deste modo, a implantação de cada caminho deve ser avaliada particularmente, levando em conta fatores como custo de implantação e relevância deste caminho ao enlace. Desta forma torna-se inviável a aplicação dos métodos computacionais, por não permitirem o controle de tais restrições.

Embora os métodos computacionais não se apliquem para a rede da UNIPAMPA, podem-se extrair informações relevantes dos estudos apresentados por Danilo (ARAÚJO, 2015), tais como a análise de quatro topologias físicas de rede apresentadas pelo autor, onde este enfatiza uma relação entre custo e probabilidade de bloqueio, mostrando que, quanto mais “malhada” for a rede, ou seja, quanto mais caminhos entre nós existirem maior será o custo de implantação da rede e, por conseguinte, menor será a probabilidade de bloqueio.

## 2.3 Fundamentação Teórica

### 2.3.1 Fibra óptica

A luz se propaga no vácuo com uma velocidade  $c = 3 \cdot 10^8$  m/s, por aproximação o mesmo valor é adotado para a propagação da luz no espaço livre. Porém quando a luz se propaga por um material qualquer, ela sofre uma redução em sua velocidade. O parâmetro que relaciona a velocidade de propagação da luz no vácuo e em um material é chamado de Índice de Refração ( $n$ ):

$$n = \frac{c}{s}, \quad (2.1)$$

onde  $s$  é a velocidade de propagação da luz no material, que sempre será menor do que  $c$ , o que resulta, invariavelmente, em um  $n$  maior do que a unidade.

A fibra óptica é formada por um material dielétrico (em geral sílica) com um formato comumente cilíndrico, que apresenta índice de refração médio de  $n_{sílica} = 1,453$ . A estrutura básica da fibra óptica é composta por um núcleo e uma casca, com índices de refração  $n_1$  e  $n_2$ , respectivamente. Para que a maior quantidade de luz seja confinada

no núcleo da fibra óptica devem ser atendidas as condições impostas pela Equação (2.2), conhecida como lei de Snell (KEISER, 2014):

$$n_1 \operatorname{sen}\varphi_1 = n_2 \operatorname{sen}\varphi_2, \quad (2.2)$$

sendo que  $\varphi_1$  e  $\varphi_2$  são os ângulos incidente e refratado, medidos em relação a normal à superfície de separação entre os dois meios. Os ângulos entre os raios incidente e refletido com a normal à superfície de separação entre os meios são idênticos, conforme apresentado na Figura 7.

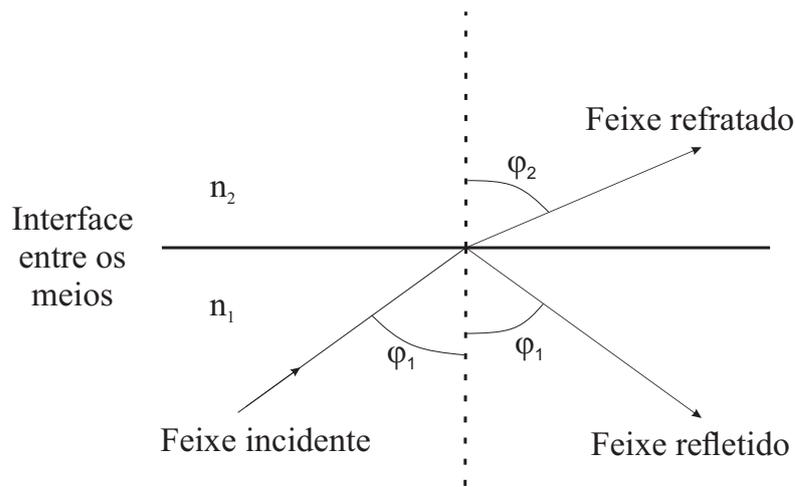


Fig. 7 – Feixe de luz incidente em uma interface entre dois materiais com índices de refração distintos, onde  $n_1 > n_2$ .

A condição de reflexão interna total ocorre para ângulos refratados superiores à 90 graus (medido com a normal). Desta forma, a partir da lei de Snell chega-se ao ângulo de incidência máximo para o qual a luz permanecerá confinada ao núcleo, que é chamado de ângulo crítico, dado pela Equação (2.3).

$$\theta_c = \operatorname{sen}^{-1} \left( \frac{n_2}{n_1} \right). \quad (2.3)$$

Sendo assim, ângulos de incidência maiores do que o ângulo crítico resultam na reflexão interna total. Esta luz pode ser entendida como uma composição de várias ondas eletromagnéticas, chamadas de modos de propagação. Na medida em que estes modos se propagam ao longo da fibra, ficam sujeitos a sofrer interferências com outros modos propagantes. Estas interferências podem ser construtivas ou destrutivas. Desta forma, dos modos que adentram, apenas os modos que sofrem interferência construtiva são permitidos propagar (KEISER, 2014).

Fibras ópticas podem ser projetadas de maneira a sustentar a propagação de vários modos, estas são chamadas de fibra multimodo. As fibras também podem permitir apenas

um modo de propagação, sendo, então, chamadas de monomodo. Para frequências ópticas, a principal diferença entre estes dois tipos de fibra é o diâmetro do núcleo, que varia de 10  $\mu\text{m}$  a 50  $\mu\text{m}$  para fibras multimodo e em torno de 4  $\mu\text{m}$  a 9  $\mu\text{m}$  para fibras monomodo, contudo, salienta-se que, o diâmetro do núcleo depende do comprimento de onda utilizado.

As características apresentadas acima permitem classificar de maneira prévia as aplicações das fibras monomodo e multimodo. Para alcançar um bom acoplamento de potência em fibras monomodo, devido ao diâmetro de seu núcleo, é fundamental o emprego de um diodo laser como fonte. Além disso, por propagar somente um modo, estas fibras não sofrem interferência modal. Então através da utilização de fontes laser operando nas janelas de baixa perda sobre fibras monomodo, consegue-se a propagação por distâncias de centenas de quilômetros sem a necessidade de amplificação do sinal. As fibras multimodo, por sua vez, permitem o uso de fontes mais simples, com larguras espectrais mais elevadas, como LEDs. A utilização de LEDs, junto à propagação de múltiplos modos, restringe a utilização deste tipo de fibra em poucos quilômetros, devido à baixa potência de emissão do LED aliado as atenuações do meio. Posto isso, serão abordados no presente trabalho somente deficiências e características referentes a fibra monomodo e laser.

### 2.3.2 Fonte

Em comunicações ópticas podem ser utilizados dois tipos de fonte de luz: os LED ou diodos laser. Ambos são construídos a partir de combinações de materiais do grupo III-V da tabela periódica.

Os LEDs tem seu princípio de funcionamento baseado no processo de emissão espontânea, e tem como característica principal a emissão de luz incoerente. Devido a isto, apresentam uma largura espectral na ordem de 70 nm, com a excitação de múltiplos modos, isso para operação na região de 1300 a 1600 nm. Além disso, os LEDs apresentam uma baixa eficiência de irradiação: em média, menos de 4% da potência óptica gerada internamente é emitida para fora do dispositivo. Como consequência, a aplicação de LEDs se limita à transmissão ao longo de pequenas distâncias sobre fibras multimodo. A impossibilidade de utilizar LEDs sobre fibra monomodo se dá pelo pequeno diâmetro do núcleo da mesma (aproximadamente 9 $\mu\text{m}$ ), o que dificulta o acoplamento de potência à fibra. Contudo, este processo de acoplamento é facilitado através da utilização de fibras multimodo (KEISER, 2014).

Já os diodos laser, através da inversão forçada de população de elétrons do estado fundamental para o estado excitado, conseguem emissões estimuladas. Uma alta seletividade no comprimento de onda de emissão é conseguida pelo emprego de uma cavidade ressonante em sua estrutura (conhecida como cavidade ressonante de Fabry-Perot). Esta seleção tem como resultado a emissão de luz altamente monocromática e muito direcional. Estes aspectos qualificam uma emissão coerente, tanto no espaço quanto no tempo (KEISER,

2014). Estas estruturas permitem atingir larguras espectrais menores do que 2 nm.

Além da cavidade ressonante, uma outra estrutura pode ser empregada para diminuir ainda mais a largura espectral de emissão dos lasers, qualificando assim o laser DFB (do inglês, *Distributed Feedback Lasers*). Os lasers DFB apresentam em sua estrutura interna grades de Bragg, que permitem uma maior seletividade nos comprimentos de onda do pulso emitido (KEISER, 2014).

### 2.3.3 Detector

Os componentes responsáveis pela conversão do sinal óptico em um sinal elétrico são chamados de fotodetectores. Existe uma vasta gama de fotodetectores, contudo, em comunicações por fibra óptica, alguns requisitos devem ser satisfeitos para que estes componentes possam ser utilizados. Estes requisitos são alta sensibilidade para os comprimentos de onda utilizados, alta velocidade de resposta aos impulsos ópticos, largura de banda proporcional à taxa de dados utilizada, dimensões físicas compatíveis com a fibra óptica e também custo compatível com os demais componentes da rede.

Posto isso, os fotodetectores baseados em semicondutores do tipo *pin* e avalanche (APD) apresentam um bom desempenho perante aos requisitos apresentados. Os fotodetectores PIN funcionam de maneira análoga aos diodos emissores de luz, porém estes tem sua junção *pn* polarizada de maneira reversa. Quando ocorre incidência de um fóton com energia maior do que a energia do *band gap* do material semiconductor (junção *pn*) excita um elétron a migrar da banda de valência para a banda de condução e dando origem aos pares elétron-buraco, também conhecidos como fotoportadores. Estes fotoportadores são gerados na região de depleção (região vazia entre as regiões *p* e *n*) e um campo elétrico resultante da polarização reversa da junção acelera os elétrons e buracos em direções opostas para o circuito externo, sendo que cada par elétron/buraco coletado dá origem a um elétron de fotocorrente externa (KEISER, 2014).

Os fotodetectores do tipo APD apresentam junções *pn* altamente dopadas. Estas regiões, quando sujeitas a uma polarização reversa de alta intensidade, fazem com que o campo elétrico criado na região de depleção seja muito intenso. O mecanismo de geração de fotoportadores é equivalente ao observado nos fotodiodos do tipo PIN. Porém, pelo forte campo elétrico, os fotoportadores propagam-se na região de depleção com altas velocidades. Durante essa propagação, pelo mecanismo de ionização por impacto, excitam mais fotoportadores. Este mecanismo gera um efeito de multiplicação da fotocorrente, possibilitando a detecção de sinais ópticos com potências extremamente baixas (KEISER, 2014).

### 2.3.4 Amplificador

Em sistemas ópticos, amplificadores são necessários quando a potência fornecida pela combinação da potência da fonte com a do receptor não é suficiente para vencer a distância de transmissão. Podem ser utilizados amplificadores ópticos baseados em semicondutor (SOA), amplificadores de fibra dopada (DFA), amplificadores Raman e também amplificadores híbridos, que combinam dois ou mais tipos.

Dentre estes tipos de amplificadores, os DFA (do inglês, Doped Fiber Amplifier) são amplamente utilizados, pela fácil conectorização à fibra, por ser menos suscetível à diafonia entre canais e também apresentar um baixo custo em relação aos demais. Nestes amplificadores, o núcleo da fibra é dopado levemente com elementos de terras raras, escolhidos de acordo com a região do espectro que se deseja amplificar. O érbio (Er), é o elemento dopante utilizado para a amplificação ao longo da banda C, estes amplificadores são conhecidos como EDFAs (do inglês, *Erbium-Doped Fiber Amplifier*). Para o presente trabalho, foram encontrados amplificadores EDFAs comerciais com ganhos de 20 dB a 56 dB (KEISER, 2014).

### 2.3.5 Conectores e Emendas

Conectores e emendas são elementos utilizados ao longo do enlace óptico para conectar uma fibra com outra, ou também para fazer a conexão da fibra óptica com componentes como fonte, detector, amplificadores e demais dispositivos que venham a integrar o enlace. São referidas como emendas as junções feitas de maneira permanente. Já a expressão conector é utilizada para referir-se a junções temporárias, as quais tem como característica serem de fácil desmonte (KEISER, 2014).

No mercado de dispositivos ópticos encontra-se uma grande variedade de conexões e emendas, onde a escolha depende da aplicação requerida. A especificação adequada destes dispositivos é de extrema importância em sistemas que empregam fibras ópticas, pois uma boa conexão ou acoplamento diminui a perda de potência do link. Prezar pela utilização de conexões e emendas de boa qualidade, com baixa atenuação inserida, permite a utilização de fibras, fontes e detectores com menores requisitos de desempenho, diminuindo, assim, o custo de implantação da rede.

As emendas podem ser feitas através de fusão de uma fibra com a outra, pela utilização de conectores mecânicos ou também utilizando tubos elásticos. Por se tratar de transmissões sobre longas distâncias, neste trabalho será abordada somente a emenda à fusão, a qual resulta em menos atenuação para o enlace. Porém, salienta-se que a utilização de qualquer tipo de emenda requer fibras com interfaces limpas e clivadas de maneira adequada, bem como fibras que apresentem mesmas características de abertura numérica (NA), perfis de índice de refração e diâmetro de núcleo (KEISER, 2014).

Na emenda à fusão, o processo de clivagem pode ser feito de forma manual ou automática, dependendo do modelo da máquina de fusão utilizada. Estas máquinas proporcionam um perfeito alinhamento mecânico entre as fibras e, posteriormente, realizam a fusão de uma fibra com a outra. A fusão é feita através da aplicação de um arco elétrico, ou um pulso laser de alta intensidade sobre a junção. Por questões de padronização, a norma TIA/EIA-568-B.3 estabelece os requisitos mínimos para componentes que compõem um enlace óptico e, segundo a norma, emendas à fusão devem apresentar atenuações inferiores a 0,3 dB.

Também podem ser feitas emendas através da utilização de conectores, os quais representam uma emenda rápida e simples, não dependendo de máquinas específicas. Estes são utilizados normalmente para fazer a conexão da fibra com outros componentes. A atenuação devida à inserção destes tipos de emendas depende das características dos conectores utilizados, podendo variar de 0,2 a 1 dB. Os conectores devem proporcionar um bom alinhamento mecânico entre as fibras, alinhamento este que deve ser mantido ao longo do tempo. Neste trabalho não serão especificados os conectores, podendo ser utilizados os tipos ST, SC, LC, MU, MT-RJ ou MPO/MTP, desde que a sua perda de inserção esteja de acordo com a faixa indicada (KEISER, 2014).

### 2.3.6 Tecnologia WDM

A capacidade de transmissão da fibra é finita, o emprego da multiplexação por divisão de comprimento de onda (WDM do inglês, *Wavelength-Division Multiplexing*) permite melhor utilizar a banda-passante da fibra. Este sistema, amplamente utilizado em comunicações ópticas, é análogo ao sistema de multiplexação por divisão de frequência FDM (do inglês, *Frequency Division Multiplexing*), largamente utilizado em comunicações por rádio-frequência. Na transmissão WDM, múltiplos fluxos de dados são transmitidos simultaneamente, cada um modulado para uma frequência óptica de portadora diferente.

### 2.3.7 Penalidades de potência

Penalidade de potência é o nível extra de potência que deve ser fornecido ao receptor para obter o mesmo desempenho (mesma BER) que seria alcançado na ausência de qualquer deficiência de propagação da fibra. Dentre os defeitos de propagação apresentados pela fibra estão a absorção, o espalhamento e a dispersão.

A dispersão intermodal é devida aos diferentes caminhos percorridos dentro da fibra por cada modo que compõem o sinal. Por este fato, somente fibras multimodo sofrem deste tipo de dispersão. A Figura 8 representa dois modos de propagação adentrando na fibra óptica, o modo fundamental e outro modo secundário, representados por raio 1 e raio 2, respectivamente.

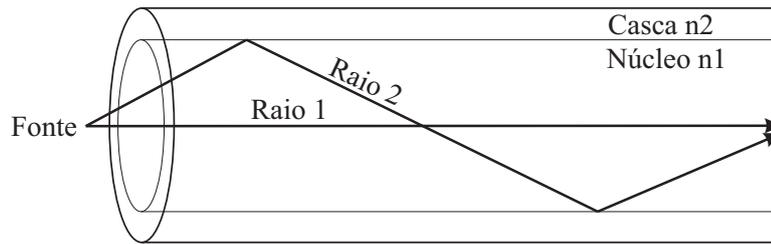


Fig. 8 – Modos de propagação adentrando em uma fibra.

Como por ser observado na Figura 8, cada modo percorre uma distância distinta dentro da fibra, chegando ao detector em tempos distintos, o que causa um alargamento no pulso. De acordo com a magnitude deste alargamento pode ocorrer interferência de *bit slots* vizinhos, impossibilitando a detecção correta ao final da transmissão. Uma alternativa para diminuir o atraso devido ao multipercurso é a utilização de fibras com índice de refração gradual.

Já a dispersão cromática é consequência de dois parâmetros constituintes da fibra: a dispersão do material e a dispersão do guia de onda. O primeiro caso ocorre pois o índice de refração é dependente do comprimento de onda da luz que propaga ao longo da fibra, esta relação pode ser observada na Equação (2.4)

$$n = \frac{c}{\lambda \nu}, \quad (2.4)$$

onde,  $\lambda$  é o comprimento de onda no meio em que se propaga e  $\nu$  é a frequência óptica, também no meio.

Como visto na subseção 2.3.1, a velocidade de propagação em um material é inversamente proporcional ao índice de refração do mesmo. Toda fonte, seja laser ou LED, possui uma largura espectral. Desta forma, cada ponto ao longo desta faixa “enxerga” um índice de refração ligeiramente distinto durante a propagação pela fibra óptica. A variação destes índices de refração faz com que uma região do pulso se propague com velocidade diferente de outra, gerando o alargamento do sinal. Este tipo de dispersão é proporcional à largura espectral da fonte, pois, quanto mais larga esta for, maior será a faixa de comprimentos de onda que abrangerá. Já a dispersão devido ao guia de onda é efeito das características geométricas da fibra e seus perfis de índice de refração, isso por estarem susceptíveis a pequenas variações no momento da fabricação (KEISER, 2014).

Por fim, a dispersão por modo de polarização (PMD) ocorre devido a birrefringência da fibra. A birrefringência é o efeito que surge quando o índice de refração em um eixo de polarização da fibra é diferente da que existe no outro eixo. Devido a esta diferença de índices, ocorre uma variação da velocidade de propagação de um eixo de polarização em relação ao outro, mesmo para fibras monomodo. Este efeito pode ser observado quando a

fibra sofre tensões ou trações excessivas ou também pode surgir no processo de fabricação. A PMD também é fortemente condicionada pela variação da temperatura no ambiente em que a fibra esta instalada. Qualquer que seja o método, toda variação no padrão circular da fibra pode gerar birrefringência. Esta dispersão é significativa somente em altas taxas de dados, geralmente acima de 2,5 Gbps. (KEISER, 2014)

Para garantir o funcionamento da rede com o desempenho esperado, efetua-se um balanço de tempo de subida de cada caminho ponto-a-ponto, de maneira a garantir o desempenho total do enlace.



## 3 Otimização dos Enlaces Ópticos da UNIPAMPA

### 3.1 Desenvolvimento Prático

Atualmente, a topologia da rede óptica que faz a conexão entre os diversos campi da UNIPAMPA é do tipo estrela, sendo esta apresentada na Figura 9. Nesta topologia, os caminhos físicos e distâncias entre o roteador do ponto de presença (POP do inglês, *Point of Presence*) RS e cada campus são desconhecidos. A operação destes é de responsabilidade de empresas contratadas pela Rede Nacional de Pesquisa (RNP).

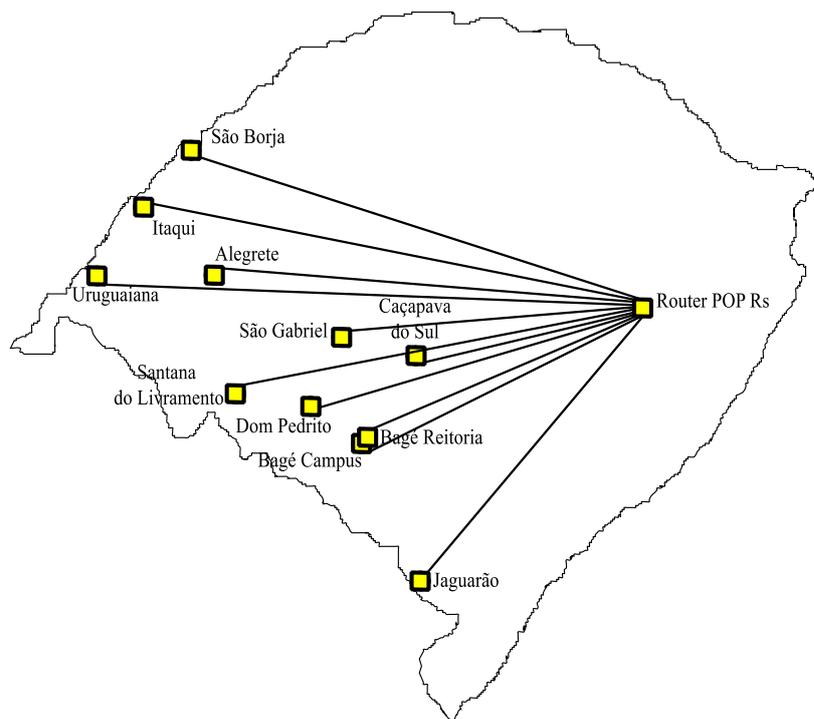


Fig. 9 – Mapa topológico da rede óptica existente entre os diversos campi da UNIPAMPA.

A topologia de rede em estrela, por suas características estruturais, não provê caminhos adicionais para o sinal diante do rompimento de um enlace ou congestionamento da rede. Além disso, a comunicação entre dois nós da rede não se dá de maneira direta. Supondo que seja desejada uma comunicação entre os campi de Itaqui e São Borja, este sinal tem de percorrer o caminho até o nó central, de onde então será encaminhado para o destino. Desta forma, qualquer sinal trafegante na rede tem que passar pelo nó central. Este fato pode gerar sobrecargas no mesmo, ocasionando atrasos na comunicação.

Com a finalidade de suprir as deficiências colocadas anteriormente, estruturou-se uma rede, considerando-se caminhos alternativos para o sinal, resultando em uma rede em malha que pode ser observada na Figura 10. Por simplicidade, atribui-se um índice para cada caminho, conforme posto na Figura 10 e, também, na Tabela 1, com isso, ao decorrer do presente trabalho, cada caminho será referenciado pelo seu respectivo índice.

A rede proposta possui um único nó que não apresenta um caminho alternativo para o sinal, sendo este o campus de Jaguarão. A implantação de um caminho adicional para este trajeto foi considerado inviável, pela grande distância para o campus mais próximo. Desta forma, o custo de implantação de um caminho adicional demandaria de um alto investimento financeiro, sem acrescentar redundância em relação aos demais campi.

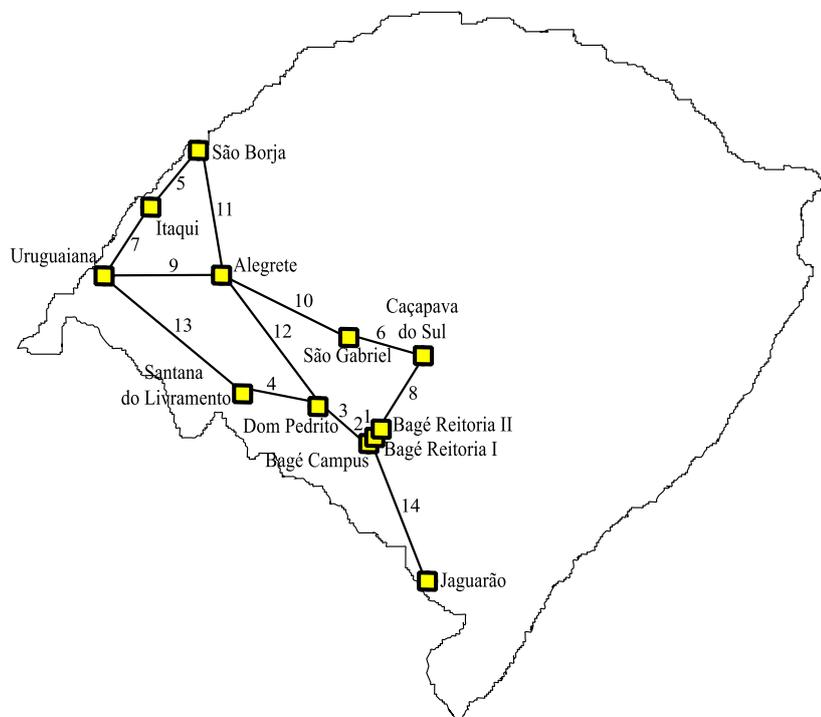


Fig. 10 – Mapa topológico das conexões lógicas da rede óptica entre os diversos campi da UNIPAMPA.

Uma característica relevante na rede proposta é a descentralização dos recursos de processamento, de forma que a comunicação entre dois nós pode ser estabelecida de maneira direta, sem a necessidade de passar por um nó central. A comunicação direta faz com que o sinal percorra uma menor distância de fibra. Visto que as fibras apresentam contribuições de atenuação, espalhamento e dispersão proporcionais à distância. A degradação do sinal durante a comunicação é inferior quando comparada com a topologia em estrela. Desta forma, esta estratégia traz benefícios para a rede bem como para o par de nós comunicantes.

As distâncias de cada caminho observado na Figura 10 são apresentadas na Tabela

1. Por questões de segurança, é considerado para este projeto uma sobra de cabo de 10 m para cada 1 km de fibra. Essa margem de segurança fica situada em caixas de emendas, distribuídas uniformemente ao longo da rede, e é utilizada em casos de rompimento de um cabo. Desta forma, evitam-se trações e tensões excessivas durante o processo de instalação e eventuais processos de manutenção do cabo óptico.

Tabela 1 – Caminhos de fibra óptica com suas respectivas distâncias, considerando uma margem de segurança de cabo de 10 m para cada 1 km.

| Índice | Caminho                             | Distância (km) | Distância + Margem (km) |
|--------|-------------------------------------|----------------|-------------------------|
| 1      | Bagé Reitoria I - Bagé Reitoria II  | 2,5            | 3                       |
| 2      | Bagé Campus - Bagé Reitoria I       | 5,1            | 6                       |
| 3      | Dom Pedrito - Bagé Campus           | 76,5           | 78                      |
| 4      | Santana do Livramento - Dom Pedrito | 93,5           | 95                      |
| 5      | Itaqui - São Borja                  | 95,6           | 97                      |
| 6      | São Gabriel - Caçapava              | 103            | 105                     |
| 7      | Itaqui - Uruguaiana                 | 105            | 107                     |
| 8      | Caçapava - Bagé Reitoria I          | 140            | 142                     |
| 9      | Uruguaiana - Alegrete               | 153            | 155                     |
| 10     | Alegrete - São Gabriel              | 164            | 166                     |
| 11     | Alegrete - São Borja                | 186            | 188                     |
| 12     | Dom Pedrito - Alegrete              | 221            | 224                     |
| 13     | Santana do Livramento - Uruguaiana  | 223            | 226                     |
| 14     | Jaguarão - Bagé Reitoria I          | 259            | 262                     |
| TOTAL  |                                     | 1827,2         | 1854                    |

O mapa da Figura 10 expõe a ligação lógica entre os diversos nós da rede proposta, enquanto a Figura 11 retrata a rota de instalação dos cabos ópticos, o qual segue o traçado rodoviário entre nós consecutivos.

A instalação dos cabos de fibra óptica pode ser aérea, em dutos subterrâneos (junto as tubulações de esgoto), submarina ou diretamente enterrada no solo. Independentemente do ambiente, a instalação deve seguir um conjunto de precauções, como evitar dobras acentuadas no cabo e tensões excessivas sobre o mesmo. Para cada cenário de instalação existe um cabo adequado, projetado levando em conta as características do ambiente, com variações em relação à capa protetora e aos elementos de tensão e torção colocados no interior do cabo (KEISER, 2014). Apesar da instalação subterrânea ser mais confiável, por estar menos sujeita a rompimentos e as intempéries climáticas, o custo de implantação da rede é mais elevado. Deste modo, em função da sua maior viabilidade financeira, ou seja, menor custo de implantação, é sugerida a instalação aérea para toda a rede. Essa instalação pode ser feita através do aluguel de postes já existentes ao longo do traçado da rede.

Além da especificação inicial dos componentes, é necessária também uma estimativa de taxa de dados a ser disponibilizada para cada campus. Para isso, levantou-se a taxa de

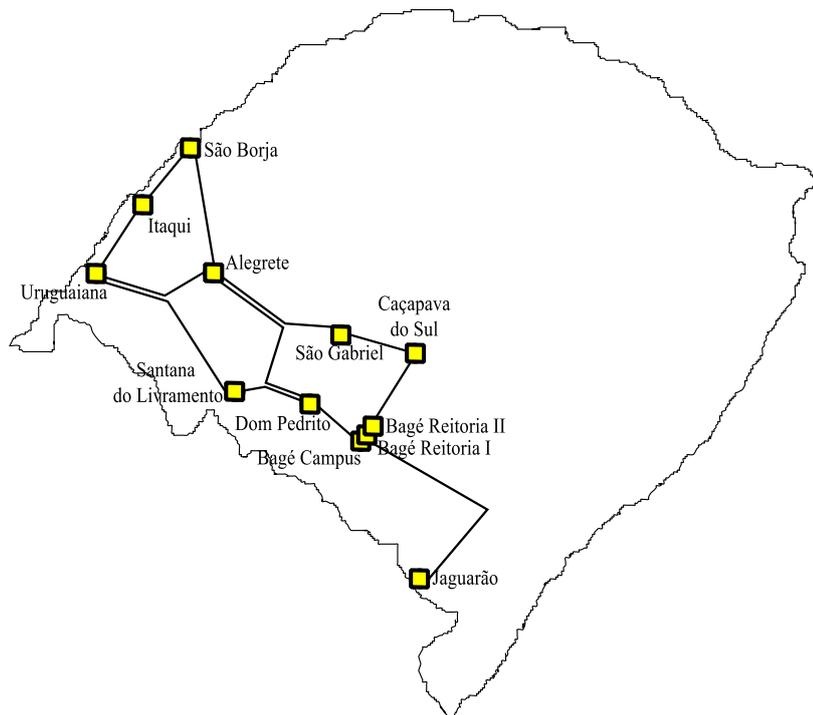


Fig. 11 – Mapa topológico da instalação dos cabos ópticos.

dados disponível para cada campus atualmente, sendo estas taxas expostas na Tabela 2. A informação exata das taxas de dados pertinentes ao campus de São Borja é desconhecida, afirma-se apenas que estas são inferiores a taxa dos campi Alegrete e Bagé.

Tabela 2 – Taxas de dados disponibilizada pela rede atual para cada campus da UNIPAMPA.

| Campus                | Download (Mbps) | Upload (Mbps) |
|-----------------------|-----------------|---------------|
| Dom Pedrito           | 16,43           | 1,21          |
| Santana do Livramento | 40,12           | 1,99          |
| Uruguaiana            | 43,66           | 8,51          |
| São Borja             | desconhecido    | desconhecido  |
| Itaqui                | 12,33           | 1,96          |
| São Gabriel           | 39,32           | 2,38          |
| Caçapava do Sul       | 10,43           | 1,38          |
| Jaguarão              | 35,86           | 1,41          |
| Bagé Reitoria         | 42,94           | 8,42          |
| Bagé Campus           | 28,25           | 1,86          |
| Alegrete              | 55,75           | 7,68          |

Observa-se que atualmente as maiores taxas de dados disponibilizadas para *download* e *upload* são de 55,75 e 8,51 Mbps, respectivamente. Para suprir a demanda de comunicação ao longo de vários anos, foi estipulada uma taxa de dados de 1 Gbps para cada par da rede

proposta. Pela possibilidade de comunicação direta entre nós ou também ao longo de vários nós da rede até o destino, esta taxa foi definida para ambos os sentidos da transmissão.

### 3.1.1 Balanço de Potência

O balanço de potência garante que o nível adequado de sinal acalçará o receptor, de modo que a informação seja recuperada de forma satisfatória (ou seja, que uma BER - taxa de erro de bit - mínima seja alcançada), garantindo o desempenho da rede.

No balanço de potência, são consideradas as parcelas de atenuação do sinal óptico inseridas por cada elemento que compõem o enlace.

Para garantir o desempenho de todos os links ao longo do tempo, é considerada uma margem de potência adicional  $M$ . Esta margem considera perdas adicionais que podem surgir ao longo do tempo, como a degradação sofrida pelos componentes do sistemas, ou emendas adicionais ao longo do enlace devido a eventuais rompimentos (KEISER, 2014).

Para o cálculo dessas potências observou-se, com base na gama de componentes disponíveis, os parâmetros de desempenho de cada componente. Através desta averiguação foram considerados os seguintes parâmetros a serem cumpridos:

- $M = 6$  dB
- $L_{bobina} = 4$  Km
- $\alpha = 0,2$  dB/Km
- $l_{emenda} = 0,3$  dB
- $l_c = 1$  dB
- BER =  $10^{-12}$
- B = Até 1 Gbps

onde  $M$  é a margem de segurança do link em dB,  $L_{bobina}$  é o comprimento da bobina de fibra em Km,  $\alpha$  é a atenuação da fibra em dB/km,  $l_{emenda}$  é a atenuação por emenda à fusão em dB e  $l_c$  é a atenuação por conector em dB. O número de emendas por fusão ( $n_{emenda}$ ) ao longo do enlace é dependente da distância entre o transmissor e o receptor ( $L$ ), e pode ser calculada pela Equação (3.1)

$$n_{emenda} = \frac{L}{L_{bobina}} - 1. \quad (3.1)$$

Foi considerado, também, para o balanço de potência a presença de dois conectores, que são instalados nas extremidades do link para a conectorização do transmissor e do

receptor (a inclusão de amplificadores implica na adição de duas conectorizações adicionais, correspondentes à entrada e saída do amplificador).

A Equação (3.2) relaciona todas as perdas presentes no link e é utilizada para efetuar o balanço de potência de um link

$$P_T = P_S - P_R = 2.l_c + \alpha.L + n_{emenda}.l_{emenda} + M, \quad (3.2)$$

onde  $P_T$  é o orçamento de potência necessário,  $P_S$  e  $P_R$  são a potência de saída da fonte e a sensibilidade do receptor, respectivamente.

Através dos valores obtidos, com a aplicação dos parâmetros adotados na Equação (3.2), foi montado o gráfico da Figura 12, que representa a diferença de níveis de potência entre a potência emitida pelo transmissor ( $P_S$ ) e a sensibilidade mínima do receptor ( $P_R$ ), ao longo de algumas distâncias, considerando todas as perdas presentes no enlace, somadas à margem de potência estabelecida ( $M = 6$ ). Este gráfico permite ao projetista determinar o orçamento de potência necessário de acordo com a distância de transmissão.

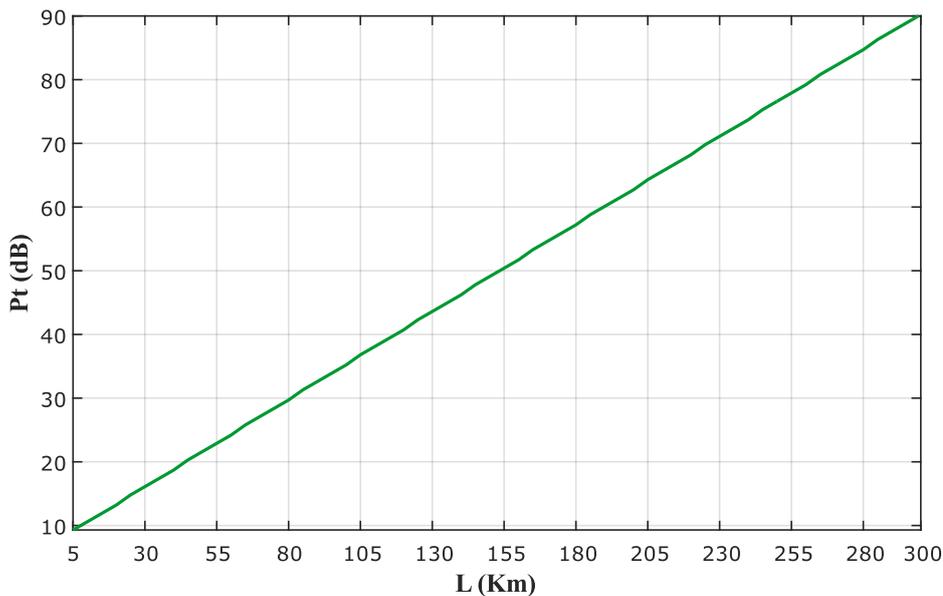


Fig. 12 – Gráfico do comprimento da fibra (L) versus a potencia total disponível(Pt).

Conhecendo-se a distância de comunicação, pode-se utilizar o gráfico da Figura 12 para encontrar diretamente o orçamento de potência necessário entre o transmissor e o receptor. Escolhe-se, então, o transmissor, com base na sua potência de saída e, tendo como base o orçamento de potência, define-se o receptor mais adequado, ou vice-versa.

Para melhor exemplificar este procedimento, utiliza-se como exemplo a comunicação entre os campi de Uruguaiana e Alegrete, distantes 155 km. A observação da Figura 12 indica um orçamento de potência de 50 dB. Escolhendo um transmissor laser com  $P_S = 5$  dBm, chega-se ao requisito de uma sensibilidade do receptor igual a  $P_R = P_S - P_T = -45$

dBm . Se não houver disponível um receptor com esse nível de sensibilidade, faz-se necessário então o emprego de amplificadores ao longo do caminho, ou então, outra iteração no projeto buscando aumentar a potência da fonte.

Baseado no gráfico da Figura 12, montou-se a Tabela 3, que expõe o orçamento de potência necessário para cada caminho(  $P_{T\text{exigida}}$ ).

Tabela 3 – Orçamento de potência exigida para cada enlace da rede.

| Caminho | $P_{T\text{exigida}}$ (dB) |
|---------|----------------------------|
| 1       | 8,3                        |
| 2       | 9,5                        |
| 3       | 29,3                       |
| 4       | 33,9                       |
| 5       | 34,6                       |
| 6       | 36,8                       |
| 7       | 37,2                       |
| 8       | 46,9                       |
| 9       | 50,4                       |
| 10      | 53,5                       |
| 11      | 59,4                       |
| 12      | 69,3                       |
| 13      | 70                         |
| 14      | 79,9                       |

A Tabela 3 considera enlaces sem amplificadores. Quando necessário a amplificação, deve-se considerar um adicional de 2 dB de potência para cada amplificador inserido no enlace, para tratar da atenuação inserida pelos seus conectores.

### 3.1.2 Balanço de Tempo de Subida

O balanço do tempo de subida garante que não ocorrerá sobreposição de *bit slots* vizinhos, uma vez que permite a comparação da largura de um *bit slot* ou fração dele com a somatória dos diversos atrasos sofridos pelo sinal ao propagar-se através do enlace óptico. Ao evitar-se a sobreposição de *bit slots*, garante-se o claro discernimento entre os níveis lógicos “1” e “0” de uma transmissão digital, independentemente da distância. Por conseguinte, taxas de dados mais altas exigem que o par transmissor/receptor tenha resposta proporcionalmente mais rápida.

O balanço de tempo de subida é calculado pela raiz quadrada da soma dos quadrados de todos os tempos de subida presentes no link. Estes tempos são o tempo de subida do transmissor  $t_{tx}$ , de velocidade de grupo da fibra (GVD)  $t_{GVD}$ , da dispersão modal  $t_{mod}$  e de subida do receptor  $t_{rx}$  (KEISER, 2014).

A contribuição do transmissor  $t_{tx}$  é encontrada no *datasheet* do componente. O

tempo de subida da fibra  $t_{GVD}$  pode ser aproximado pela Equação (3.3) (KEISER, 2014)

$$t_{GVD} = |D|L\sigma_\lambda, \quad (3.3)$$

onde  $\sigma_\lambda$  é a largura espectral da fonte,  $D$  é a dispersão fornecida pela folha de dados da fibra e  $L$  é a distância do link.

O tempo de subida do receptor é dado pela Equação (3.4) (KEISER, 2014)

$$t_{rx} = \frac{350}{B_e(MHz)}, \quad (3.4)$$

onde  $B_e$  é a largura de banda elétrica do receptor e é considerada diretamente em MHz.

O tempo de subida devido à dispersão modal é calculado utilizando a Equação (3.5) (KEISER, 2014)

$$t_{mod} = \frac{440L^q}{B_0} \quad (3.5)$$

sendo que  $B_0$  é a largura de banda de um cabo de comprimento de 1 km e é considerada diretamente em MHz. O parâmetro  $q$  é comumente utilizado como sendo 0,7.

O tempo de subida total de um sistema é calculado então pela Equação (3.6) (KEISER, 2014)

$$t_{sist} = \left( t_{tx}^2 + (|D|L\sigma_\lambda)^2 + \left( \frac{440L^q}{B_0} \right)^2 + \left( \frac{350}{B_e(MHz)} \right)^2 \right)^{\frac{1}{2}}. \quad (3.6)$$

Contudo, o tempo de subida devido à dispersão modal é relevante somente para fibras multimodo. Desta forma, para o presente trabalho, esta parcela de tempo pode ser desconsiderada, uma vez que optou-se pelo emprego exclusivo de fibras monomodo. Sendo assim, a equação final para o balanço de tempo de subida fornece o tempo do sistema ( $t_{sist}$ ), dado pela Equação (3.7)

$$t_{sist} = \left( t_{tx}^2 + (|D|L\sigma_\lambda)^2 + \left( \frac{350}{B_e(MHz)} \right)^2 \right)^{\frac{1}{2}}. \quad (3.7)$$

O tempo total do sistema não deve exceder 70 % do tempo de um bit ( $T_b = 1/B$ ) para sistemas NRZ (não retorno a zero) ou 35 % do tempo de bit para RZ (retorno a zero) (KEISER, 2014). Um tempo de sistema maior do que a fração de 70 ou 35 % do tempo de bit causará interferência entre pulsos adjacentes, o que pode levar ao aumento da BER.

No cenário da rede proposta, o balanço de tempo de subida foi efetuado somente para a maior distância, sendo este o caso em que a dispersão é maior. Desta forma, garante-se a correta operação para quaisquer especificações dos demais caminhos. As especificações para cada componente foram estabelecidas perante uma análise de toda a gama de componentes disponíveis, estas são apresentadas abaixo:

- $t_{tx} = 25$  ps
- $B_e = 2,5$  GHz
- $D = 18$  ps/(nm . km)
- $L = 262$  km
- $\sigma_\lambda = 1$  nm
- $BER = 10^{-12}$
- $B =$  Até 1 Gbps

Aplicando os valores mencionados acima na Equação (3.7), encontra-se um tempo de sistema igual a  $0,1422$  ns. Este tempo é avaliado perante ao tempo de bit do sistema, para um formato de dados RZ e uma taxa de dados de 1 Gbps:

$$T_b = 0,35 \frac{1}{1 \times 10^9} = 0,35 \text{ ns.}$$

Desta forma, como o tempo do sistema é menor do que 35 % do tempo de bit  $0,1422 \text{ ns} < 0,35 \text{ ns}$ , valida-se o caminho de maior distância perante a dispersão. Isso mostra que a escolha destes componentes (fonte, fibra e receptor) foi feita de maneira adequada para satisfazer os requisitos de tempo de resposta do sistema, respeitando o limite imposto pela dispersão, e garantindo que a taxa de erros seja a menor possível, de acordo com a taxa de dados em questão.

### 3.1.3 Especificação dos Componentes e Levantamento dos Custos

Até então, foram levantados os requisitos de desempenho de fontes, receptores e amplificadores. Nesta seção, será feita a escolha dos componentes de acordo com os requisitos necessários, mostrados anteriormente. Foram realizadas três abordagens de projeto, para a mesma topologia de rede, considerando três diferentes conjuntos de componentes. Para cada abordagem, foi feito um levantamento de custos para aquisição dos componentes especificados.

O primeiro aspecto a ser considerado, para a especificação dos componentes, é a distância entre os nós consecutivos da rede, previamente expostas na Tabela 1. Apresentando, quase em sua totalidade, longas distâncias entre nós consecutivos, de maneira que, o emprego de fibra monomodo torna-se necessário. Como consequência da utilização de fibra monomodo, conforme discutido na seção 2.3, se faz necessário empregar fontes laser. O tipo do receptor (PIN ou APD) e a necessidade de amplificadores em cada enlace serão escolhidos de acordo com a demanda de potência necessária.

Após uma vasta pesquisa no mercado de componentes ópticos, observou-se que, para redes comerciais, transceptores são largamente utilizados. Transceptores são dispositivos que combinam transmissor (fonte óptica) e receptor (fotodetector) em um único encapsulamento, mostrado na Figura 13. Fazendo o aproveitamento do mesmo circuito eletrônico para ambas as funções, estes dispositivos proporcionam uma grande economia de espaço nos racks de comunicação, o que possibilita uma alta densidade de portas ópticas de entrada e de saída. Além do espaço, economia em termos de custo e consumo de energia também são alcançadas com o emprego destes componentes.



Fig. 13 – Encapsulamento padrão de um transceptor (INC., 2017).

A escolha dos componentes para todos os caminhos da rede proposta seguem os mesmos critérios, devidamente apresentados nas seções anteriores. Este padrão de escolha se manteve durante a execução deste projeto, sem envolver a especificação dos mecanismos de gestão de tráfego internos aos nós (comutação, roteamento, adição, remoção, ou atribuição de canais). Fica, portanto, a especificação destes mecanismos relegada ao projeto lógico de gestão de tráfego da rede, que está além do escopo da presente proposta.

Além de todos os links atenderem aos mesmos requisitos de desempenho, os componentes da rede foram escolhidos de forma que todos os transceptores utilizados fossem provenientes de um mesmo fabricante, assim como os amplificadores. Por exemplo, todos os transceptores utilizados são da linha EOLS-1512 da Eoptolink (INC., 2017). Para todas as versões desta linha, os dispositivos apresentam uma mesma largura espectral, mesmo tempo de subida do transmissor, variando somente o orçamento de potência proporcionado. Este cuidado foi tomado pelo fato de que esta é uma proposta que visa servir como base para uma futura melhoria na comunicação de uma instituição federal de ensino, de modo que, durante a implantação da mesma, os componentes serão adquiridos via licitação pública e, provavelmente, serão providos por uma só empresa.

Esta abordagem fez com que a especificação de transceptores ficasse restrita a componentes de médio a longo alcance. O transceptor de menor desempenho da linha utilizada apresenta 21 dB de orçamento de potência, posto pelo fabricante com alcance de

até 40 Km. Para componentes de menor alcance, os fabricantes utilizam fontes e receptores com diferentes características, que visam diminuir o custo do equipamento, como fontes com maiores larguras espectrais e detectores com larguras de banda menores. Além desta série de transceptores, foram estudados e orçados outros dispositivos de diferentes marcas, onde o menor orçamento de potência encontrado foi de 20 dB para o transceptor GPC-xx24-04x(D) da Gigalight (GIGALIGHT, 2006). Porém optou-se pela série EOLS-1512 da Eoptolink (INC., 2017) por apresentar uma maior diversidade de orçamentos de potência.

Já para os amplificadores EDFA, encontrou-se uma maior diversidade de ganhos, porém ainda com uma limitação inferior de desempenho. A linha escolhida foi a FWA-1550L Series da Fullwell (CO., 2017), que apresenta ganhos de 20 a 56 dB. A potência exigida ( $P_{exigida}$ ) apresentada em todas as propostas considera uma margem adicional de potência de 2 dB para cada amplificador inserido no link, devida à atenuação inserida pelos dois conectores utilizados para ligar o mesmo. Para o caminho 14, optou-se por utilizar dois amplificadores em cascata, exigindo um adicional de 4 dB para tratar das perdas dos conectores necessários para as interconexões.

Para estabelecer a comunicação entre todos os nós da rede, foram previstos 12 comprimentos de onda, além de um comprimento de onda adicional para comunicação externa em cada nó, totalizando 13 comprimentos de onda por nó, conforme apresentado na Figura 14. Para cada comprimento de onda, tem-se um transceptor com um transmissor e um receptor integrado. Cada comprimento de onda apresenta capacidade de 1 Gbps.

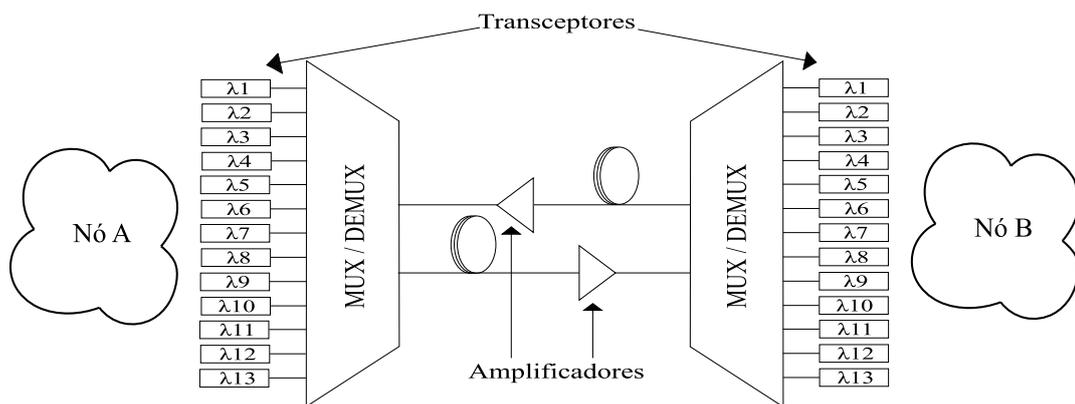


Fig. 14 – Esquemático dos componentes empregados entre dois nós consecutivos no cenário da rede proposta.

Percebe-se, pela Figura 14, que cada enlace amplificado necessita dois EDFAs, um para cada sentido da comunicação. Os mecanismos de multiplexação e demultiplexação dependem da técnica de roteamento aplicada ao nó, conforme encontrado em (SIMMONS, 2008).

Em uma primeira iteração do projeto, são especificadas fontes e detectores para o caminho mais longo da rede, que demanda de um orçamento de potência de 84 dB (considerando a adição de dois amplificadores, que necessitam de 2 conectores cada, com atenuação de 1 dB por conector). Este transceptor foi replicado a todos os demais caminhos da rede. Dentre os transceptores analisados, o modelo EOLS-1512-160 (apresentado na Tabela 13, seção Anexos) foi o que apresentou o maior orçamento de potência atendendo os requisitos buscados. Este orçamento é sustentado por um laser DFB com  $P_{Stipica} = 5$  dBm em conjunto com um fotodiodo do tipo APD com  $P_{Rtipica} = -37$  dBm, que resulta em  $P_T = 42$  dB.

A Tabela 4 mostra, de acordo com a necessidade de potência, quais os enlaces que necessitam amplificação, considerando o laser de maior desempenho.

Tabela 4 – Requisitos de potência dos dispositivos para cada caminho.

| Camino | $P_{T\text{exigida}}$ (dB) | $P_{T\text{disponível}}$ (dB) | Ganho necessário (dB) |
|--------|----------------------------|-------------------------------|-----------------------|
| 1      | 8,3                        | 42                            | -                     |
| 2      | 9,5                        | 42                            | -                     |
| 3      | 29,3                       | 42                            | -                     |
| 4      | 33,9                       | 42                            | -                     |
| 5      | 34,6                       | 42                            | -                     |
| 6      | 36,8                       | 42                            | -                     |
| 7      | 37,2                       | 42                            | -                     |
| 8      | 46,9                       | 42                            | 4,9                   |
| 9      | 50,4                       | 42                            | 8,4                   |
| 10     | 53,5                       | 42                            | 11,5                  |
| 11     | 59,4                       | 42                            | 17,4                  |
| 12     | 69,3                       | 42                            | 27,3                  |
| 13     | 70                         | 42                            | 28                    |
| 14     | 79,9                       | 42                            | 37,7                  |

Para os caminhos que necessitam de orçamentos de potência maiores que 42 dB, foram ajustados os ganhos conforme os amplificadores EDFAs disponíveis (Tabela 14). Para o caminho 14, que necessita de 42 dB de amplificação, foram especificados dois amplificadores, distribuídos ao longo do trajeto e distantes entre si. Este ganho foi distribuído em dois amplificadores para evitar o surgimento de efeitos não lineares devido aos níveis elevados de potência lançados na fibra. Os componentes escolhidos para esta proposta e seus desempenhos estão mostrados na Tabela 5.

Todos os requisitos de potência e dispersão são atendidos por esta proposta. Porém alguns caminhos demonstram um superdimensionamento e, por este fato, esta proposta é referenciada como não otimizada. Nesta versão, todos os caminhos que não necessitam de amplificadores apresentam uma potência excedente à necessária, assim como os caminhos 8, 9 e 10. Este fato, além de gerar um custo desnecessário em termos de rede, também pode gerar saturações nos fotodiodos.

Tabela 5 – Componentes escolhidos com suas respectivas potências para a proposta não otimizada.

| Caminho | $P_{T_{exigida}}$ (dB) | Transceptor   | $P_T$ (dB) | Amplificador               | G (dB)   | $P_T+G$ (dB) |
|---------|------------------------|---------------|------------|----------------------------|----------|--------------|
| 8       | 48,9                   | EOLS-1512-160 | 42         | FWA-1550L-5                | 20       | 62           |
| 9       | 52,4                   | EOLS-1512-160 | 42         | FWA-1550L-5                | 20       | 62           |
| 10      | 55,5                   | EOLS-1512-160 | 42         | FWA-1550L-5                | 20       | 62           |
| 11      | 61,4                   | EOLS-1512-160 | 42         | FWA-1550L-5                | 20       | 62           |
| 12      | 71,3                   | EOLS-1512-160 | 42         | FWA-1550L-15               | 30       | 72           |
| 13      | 72,0                   | EOLS-1512-160 | 42         | FWA-1550L-15               | 30       | 72           |
| 14      | 83,9                   | EOLS-1512-160 | 42         | FWA-1550L-5<br>FWA-1550L-7 | 20<br>22 | 84           |

Para a eliminação do excesso de potência, sugere-se o emprego de atenuadores fixos. Essa especificação serve para equalizar as altas potências perante aos demais, bem como garantir o perfeito funcionamento do fotodetector. Atenuadores fixos são uma opção simples e barata para efetuar a equalização de um enlace, sendo estas características a razão pela qual foi optado pela utilização destes componentes. Eles são conectados na extremidade do enlace, imediatamente antes do receptor. Encontram-se atenuadores fixos que proporcionam atenuações na faixa de 1 a 40 dB.

Além do desempenho, um fator importante quando se trata de qualquer projeto, é o levantamento dos custos de sua implantação. Neste trabalho, todos os valores apresentados foram levantados junto aos fornecedores de cada componente. Porém ressalta-se que todos os valores apresentados estão sujeitos a variações. Na Tabela 6, são exibidos os valores correspondentes à proposta não otimizada. Maiores informações referentes aos modelos de transceptores, amplificadores e cabos ópticos podem ser encontradas nas Tabelas 13, 14 e 15, respectivamente, postas na seção Anexos.

Tabela 6 – Levantamento de custos com componentes para a proposta não otimizada.

|                | Modelo         | Quantidades | Valor Unitário (R\$) | Total                 |
|----------------|----------------|-------------|----------------------|-----------------------|
| Transceptores  | EOLS-1512-160  | 364         | 209,30               | 76.185,20             |
|                | FWA-1550L - 5  | 10          | 3.381,00             | 33.810,00             |
| Amplificadores | FWA-1550L - 7  | 2           | 3.445,40             | 6.890,80              |
|                | FWA-1550L - 15 | 4           | 4.379,20             | 17.516,8              |
| Total Amp.     |                | 16          |                      | R\$ 58.217,60         |
| <b>TOTAL</b>   |                |             |                      | <b>R\$ 134.402,80</b> |

Uma nova iteração do projeto foi feita ajustando as potências dos transceptores com os requisitos necessários. Em função da otimização, foram empregados apenas os componentes necessários ao atendimento do orçamento de potência de cada link. Deste modo, buscou-se eliminar os excessos de potência e reduziu-se o custo de implantação do sistema. Os componentes escolhidos para essa proposta otimizada são apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 – Componentes escolhidos com suas respectivas potências para a proposta otimizada.

| Caminho | $P_{T\text{exigida}}$ (dB) | Transceptor   | $P_T$ (dB) | Amplificador               | G (dB)   | $P_T+G$ (dB) |
|---------|----------------------------|---------------|------------|----------------------------|----------|--------------|
| 1       | 8,3                        | EOLS-1512-40  | 21         | -                          | -        | 21           |
| 2       | 9,5                        | EOLS-1512-40  | 21         | -                          | -        | 21           |
| 3       | 29,3                       | EOLS-1512-100 | 31         | -                          | -        | 31           |
| 4       | 33,9                       | EOLS-1512-120 | 35         | -                          | -        | 35           |
| 5       | 34,6                       | EOLS-1512-120 | 35         | -                          | -        | 35           |
| 6       | 36,8                       | EOLS-1512-160 | 42         | -                          | -        | 42           |
| 7       | 37,0                       | EOLS-1512-160 | 42         | -                          | -        | 42           |
| 8       | 48,9                       | EOLS-1512-80  | 27         | FWA-1550L-7                | 22       | 49           |
| 9       | 52,4                       | EOLS-1512-100 | 31         | FWA-1550L-7                | 22       | 53           |
| 10      | 55,5                       | EOLS-1512-120 | 35         | FWA-1550L-6                | 21       | 56           |
| 11      | 61,4                       | EOLS-1512-160 | 42         | FWA-1550L-5                | 20       | 62           |
| 12      | 71,3                       | EOLS-1512-160 | 42         | FWA-1550L-15               | 30       | 72           |
| 13      | 72,0                       | EOLS-1512-160 | 42         | FWA-1550L-15               | 30       | 72           |
| 14      | 83,15                      | EOLS-1512-160 | 42         | FWA-1550L-5<br>FWA-1550L-7 | 20<br>22 | 84           |

Porém para os enlaces 1, 2, 3, 4, 6 e 7, ainda tem-se potências adicionais às necessárias.

A tabela 8 apresenta os valores referentes à proposta otimizada, onde pode-se notar que através da escolha dos transceptores e amplificadores adequados alcançou-se uma redução de mais de quatorze mil reais no custo do projeto.

Tabela 8 – Levantamento de custos com componentes para a proposta otimizada.

|                | Modelo         | Quantidades | Valor Unitário (R\$) | Total                 |
|----------------|----------------|-------------|----------------------|-----------------------|
| Transceptores  | EOLS-1512-40   | 52          | 90,16                | 4.688,32              |
|                | EOLS-1512-80   | 26          | 109,48               | 2.846,48              |
|                | EOLS-1512-100  | 52          | 144,90               | 7.534,80              |
|                | EOLS-1512-120  | 78          | 173,88               | 13.562,64             |
|                | EOLS-1512-160  | 156         | 209,30               | 32.650,80             |
| Total Trans.   |                | 364         |                      | R\$ 61.283,04         |
| Amplificadores | FWA-1550L - 5  | 4           | 3.381,00             | 13.524,00             |
|                | FWA-1550L - 6  | 2           | 3.413,20             | 6.826,40              |
|                | FWA-1550L - 7  | 6           | 3.445,40             | 20.672,40             |
|                | FWA-1550L - 15 | 4           | 4.379,20             | 17.516,80             |
| Total Amp.     |                | 16          |                      | R\$ 58.539,60         |
| <b>TOTAL</b>   |                |             |                      | <b>R\$ 119.822,64</b> |

A terceira abordagem de projeto é uma contraproposta à proposta otimizada, onde foram aumentados os ganhos dos amplificadores e diminuídos os orçamentos de potência dos transceptores. Esta abordagem permite avaliar, em termos de custo com componentes, qual é a estratégia mais viável: níveis mais elevados de potência fornecidos

pelos transceptores ou maiores ganhos para os amplificadores. Os componentes escolhidos para tal proposta estão listados na Tabela 9.

Tabela 9 – Componentes escolhidos com suas respectivas potências para a terceira abordagem do projeto, a contraproposta otimizada.

| Caminho | $P_{T_{exigida}}$ (dB) | Transceptor   | $P_T$ (dB) | Amplificador                 | G (dB)   | $P_T+G$ (dB) |
|---------|------------------------|---------------|------------|------------------------------|----------|--------------|
| 1       | 8,3                    | EOLS-1512-40  | 21         | -                            | -        | 21           |
| 2       | 9,5                    | EOLS-1512-40  | 21         | -                            | -        | 21           |
| 3       | 29,3                   | EOLS-1512-100 | 31         | -                            | -        | 31           |
| 4       | 33,9                   | EOLS-1512-120 | 35         | -                            | -        | 35           |
| 5       | 34,6                   | EOLS-1512-120 | 35         | -                            | -        | 35           |
| 6       | 36,8                   | EOLS-1512-160 | 42         | -                            | -        | 42           |
| 7       | 37,0                   | EOLS-1512-160 | 42         | -                            | -        | 42           |
| 8       | 48,9                   | EOLS-1512-40  | 21         | FWA-1550L-13                 | 28       | 49           |
| 9       | 52,4                   | EOLS-1512-40  | 21         | FWA-1550L-17                 | 32       | 53           |
| 10      | 55,5                   | EOLS-1512-40  | 21         | FWA-1550L-20                 | 35       | 56           |
| 11      | 61,4                   | EOLS-1512-80  | 27         | FWA-1550L-20                 | 35       | 62           |
| 12      | 71,3                   | EOLS-1512-160 | 42         | FWA-1550L-15                 | 30       | 72           |
| 13      | 72,0                   | EOLS-1512-160 | 42         | FWA-1550L-15                 | 30       | 72           |
| 14      | 83,9                   | EOLS-1512-40  | 21         | FWA-1550L-16<br>FWA-1550L-17 | 31<br>32 | 84           |

Os custos relativos à terceira abordagem do projeto são apresentados na Tabela 10.

Tabela 10 – Levantamento de custos com componentes para a contraproposta otimizada.

|                | Modelo         | Quantidades | Valor Unitário (R\$) | Total                 |
|----------------|----------------|-------------|----------------------|-----------------------|
| Transceptores  | EOLS-1512-40   | 156         | 90,16                | 14.064,96             |
|                | EOLS-1512-80   | 26          | 109,48               | 2.846,48              |
|                | EOLS-1512-100  | 26          | 144,90               | 3.767,40              |
|                | EOLS-1512-120  | 52          | 173,88               | 9.041,76              |
|                | EOLS-1512-160  | 104         | 209,30               | 21.767,20             |
| Total Trans.   |                | 364         |                      | R\$ 51.487,80         |
| Amplificadores | FWA-1550L - 13 | 2           | 4.044,32             | 8.088,64              |
|                | FWA-1550L - 15 | 4           | 4.379,20             | 17516,8               |
|                | FWA-1550L - 16 | 2           | 4.546,64             | 9093,28               |
|                | FWA-1550L - 17 | 4           | 4.714,08             | 18.856,32             |
|                | FWA-1550L - 18 | 4           | 4.881,52             | 19.526,08             |
| Total Amp.     |                | 16          |                      | R\$ 73.081,12         |
| <b>TOTAL</b>   |                |             |                      | <b>R\$ 124.568,92</b> |

Além dos dispositivos, a especificação das fibras ópticas seguiram os requisitos propostos durante o balanço de tempo e potência. Os requisitos para a escolha foram: uma fibra monomodo com constante de atenuação de 0,2 dB/km e dispersão de 18 ps/(nm . km), para a operação na banda C (1530 nm a 1565 nm). Já para os cabos, os requisitos foram conter em seu interior 12 fibras, apresentar elementos de tração capazes de sustentar distâncias entre vãos de postes de 120 m e comprimentos de 4 km entregues em bobinas.

Os modelos de cabos CFOA-SM-ASU120-12-NR da Furukawa ([GROUP, 2017](#)), CFOA-SM-AS120-S 12F TS NR da Cablena ([LTDA, 2017](#)) e CFOA-SM-ASU-120-RA-012-NR da ZTT ([BRASIL, 2017](#)) foram os que atenderam todos os requisitos buscados. Tendo as mesmas características de desempenho, foi feita a especificação de maneira objetiva com base nos custos levantados a seguir. O orçamento dos três cabos analisados são apresentados na Tabela 11.

Tabela 11 – Levantamento de custos de cabos ópticos provenientes de três fabricantes distintas.

| Referência do produto       | Valor unitário (R\$/m) | Quantidade (Km) | Total (R\$)  |
|-----------------------------|------------------------|-----------------|--------------|
| CFOA-SM-ASU120-12-NR        | 2,9717                 | 1.854           | 5.509.531,80 |
| CFOA-SM-AS120-S 12F TS NR ' | 2,123                  | 1.854           | 3.936.042,00 |
| CFOA-SM-ASU-120-RA-012-NR   | 1,9800                 | 1.854           | 3.670.920,00 |

## 3.2 Análise de Resultados

Em relação à rede atual, a rede proposta apresenta desempenho superior: prevê treze canais de transmissão em ambos os sentidos com taxa de dados de 1 Gbps. Por proporcionar caminhos alternativos e diretos para os sinais entre dois nós, a rede proposta apresenta benefícios relevantes relacionados ao menor impacto das deficiências de transmissão (em função da menor distância), à indisponibilidade de conexão e ao tempo necessário ao estabelecimento da comunicação. Estes benefícios, além de agregarem disponibilidade e confiabilidade, permitem à UNIPAMPA assegurar os requisitos de desempenho à comunicação entre seus campi por um longo prazo.

Dentre todas as propostas apresentadas, considera-se a proposta otimizada como sendo a melhor alternativa de implantação. A proposta não-otimizada serve apenas como referência, dado que alguns dos seus componentes estão superdimensionados, de modo que o seu custo elevado inviabiliza a sua instalação. Já a contraproposta otimizada (última apresentada), mostrou uma diminuição de R\$ 9.795,24 em transceptores, porém o gasto em amplificadores aumentou R\$ 14.541,52, o que resultou em um custo de R\$ 4.746,00 superior a proposta otimizada.

A atenuação para todas as emendas a fusão foi considerada como sendo a máxima permitida pela ITU-T, ou seja, 0,3 dB. Todavia, as máquinas a fusão atuais proporcionam características de atenuação por emenda inferiores a 0,1 dB. Desta forma, garantindo-se uma boa fusão, a demanda de potência ao longo dos enlaces seria menor e, conseqüentemente, os requisitos de desempenho dos componentes seriam igualmente menores. Um acréscimo de margem de potência poderá ser eventualmente alcançado através do emprego de conectores com perda de inserção menores do que 1,0 dB.

Em relação ao cabo de fibra óptica, a empresa ZTT (BRASIL, 2017) apresentou o menor preço, mantendo as especificações necessárias. O custo para 1854 km de cabos ficou em R\$ 3.670.920,00. É importante ressaltar que, como se trata de uma rede de longa distância, contendo caminhos alternativos, invariavelmente o valor agregado de investimento com cabos é alto. Porém, serão utilizadas apenas duas fibras (uma para cada direção de propagação), sendo que todos os cabos especificados contêm em seu interior doze fibras monomodo, o que possibilita o aluguel ou venda das dez fibras restantes, de forma que o valor final seja dividido entre todos os usuários dessas doze fibras. Esta consideração foi feita para a realização de um cálculo de retorno do investimento mais realista.

Porém, conforme mencionado acima, este custo pode ser dividido proporcionalmente de acordo com o número de fibras utilizadas. Desta forma, o investimento pela parte da UNIPAMPA reduz-se à R\$ 611.820,00, conforme mostrado a seguir:

$$\begin{aligned} \text{Custo unipampa} &= \left( \frac{3.670.920,00 \text{ (Custo Total)}}{12(\text{fibras disponíveis})} \right) \times 2(\text{fibras utilizadas}) \\ &= \text{R\$ } 611.820,00. \end{aligned}$$

O valor a ser investido pela instituição para a aquisição dos componentes orçados, considerando a proposta otimizada e a divisão proporcional a utilização de duas fibras, é apresentado na Tabela 12

Tabela 12 – Custo referente aos componentes da camada física da rede proposta, para a UNIPAMPA.

|                               |                       |
|-------------------------------|-----------------------|
| Cabo CFOA-SM-ASU-120-RA-012-N | R\$ 611.820,00        |
| Proposta otimizada            | R\$ 119.822,64        |
| <b>Total</b>                  | <b>R\$ 731.642,64</b> |

Este valor engloba somente as despesas referentes aos componentes da camada física, os quais foram especificados. Por questões de comparação, serão considerados valores estimados para tratar dos custos operacionais e custos relativos aos componentes da camada lógica, que estão além do escopo, mas que complementam os custos da presente proposta.

São considerados como sendo dois os custos majoritários para a implantação de uma rede óptica: o custo com os componentes da rede CapEx (do inglês, *Capital Expenditures*) e os custos com a operação da rede OpEx (do inglês, *Operational Expenditures*) que envolve os custos de instalação, manutenção, energia e aluguel de espaços, dentre outros. Segundo (SIMMONS, 2008), os custos CapEx e OpEx se relacionam da seguinte forma:

$$1,3 < \frac{CapEx}{OpEx} < 4,0.$$

Neste contexto, será considerado o pior caso, onde o CapEx é apenas 30 % superior ao OpEx. Os custos CapEx são divididos em duas porções: os custos referentes aos componentes da camada física e os custos dos componentes da camada lógica (responsáveis pela roteamento, regeneração e encaminhamento). Neste trabalho, adota-se uma estimativa de que o custo relativo aos componentes da camada lógica é 5 vezes superior ao custo com os componentes da camada física (SIMMONS, 2008). Desta forma, tem-se que

$$CapEx = (5 \times 731.642,64) + 731.642,64 = R\$ 4.389.855,84.$$

Utilizando as estimativas postas acima, calcula-se então o gasto total aproximado para a implantação de rede proposta

$$\begin{aligned} Custo\ Final &= OpEx + CapEx = 1,7692 \times CapEx \\ &= R\$ 7.766.668,02. \end{aligned}$$

Sendo este custo total para a implantação de uma rede própria, coloca-se os gastos da rede atual da instituição, obtidos através de uma licitação vigente no mesmo período de execução do presente trabalho. Esta licitação busca provedores para fornecer duas conexões com taxas de dados de 100 Mbps, uma para o campus Alegrete e outra para a reitoria em Bagé. Ainda, para o campus Alegrete, o fornecedor deve prover uma conexão com link dedicado de 100 Mbps. Além destes, são pedidos outros 9 enlaces com taxas de dados de 20 Mbps, um para cada um dos campi restantes. O contratante deve fornecer estes serviços ao longo de um período de um ano. O custo anual especificado na licitação para manter estes serviços é de R\$ 396.900,00.

Outro ponto relevante observado nesta licitação é a cobrança de multas sempre que o índice de disponibilidade de serviços for inferior a 99 %. Também preveem-se multas para percentuais de perdas de pacotes maiores do que 1 % e atrasos no envio de pacotes de um ponto a outro da rede superiores a 100 ms.

Para isto, e de maneira qualitativa, faz-se um cálculo aproximado do tempo de retorno do investimento. Considera-se como quitado o investimento quando o valor total gasto pela UNIPAMPA anualmente com o aluguel dos serviços de comunicação por fibra óptica atinja o custo de implantação da rede proposta. Esta estimativa é baseada no edital N°00022/2017 – 000 de 2017. No edital, consta que a instituição desembolsa anualmente aproximadamente R\$ 400.000,00 (quatrocentos mil reais) referentes à conexão de dados via cabos ópticos entre todos os campi.

Desta forma, sob estas considerações, e mantendo o investimento anual de R\$ 400.000,00, a instituição quitaria o investimento em uma rede óptica própria, com todas as qualidades anteriormente mencionadas, em aproximadamente 20 anos. Isso mostra,

de maneira inicial, mas de forma objetiva, que o investimento em uma topologia de rede própria com as características propostas proporcionaria grandes benefícios para a instituição como: aumento da capacidade de comunicação, diminuição do atraso de envio de pacotes, dentre outras. Estes benefícios não são somente em questão de eficiência e capacidade de comunicação, mas também no âmbito econômico, uma vez que a proposta prevê taxas de dados capazes de suprir a demanda da instituição ao longo de muitos anos.



## 4 Conclusão

Neste trabalho foram propostos importantes avanços técnicos para a conexão óptica entre os campi da Universidade Federal do Pampa. Isso se deu através do estudo e avaliação da rede óptica existente, onde foi constatada uma topologia do tipo estrela. Esta topologia apresenta algumas deficiências, como a ausência de caminhos alternativos para tratar de falhas e também a impossibilidade de comunicação direta entre campi vizinhos. A partir disso, foi estruturada uma topologia de rede que suprisse tais deficiências. Cada caminho da rede proposta foi avaliado particularmente em função de sua importância para o enlace como um todo, chegando a uma topologia do tipo malha. Esta topologia provê caminhos alternativos para os sinais em todos os campi, com exceção do campus de Jaguarão, onde a implantação de um caminho redundante foi considerada inviável.

A partir da topologia, foram estabelecidos requisitos de desempenho para a rede proposta, tais como o alcance necessário e uma taxa de dados de 1 Gbps para todos os campi, em ambos os sentidos, *download* e *upload*. Para garantir este desempenho, foram efetuados os balanços de tempo e potência de todos os caminhos. Definiu-se então, pelas longas distâncias presentes na rede, o uso de fibras monomodo com atenuação de 0,2 dB/km. A partir disso, foi estabelecido o uso de fontes laser. De acordo com o orçamento de potência necessário em cada caminho, foram definidas as potências dos lasers e a sensibilidade dos fotodetectores. De acordo com a necessidade, foram empregados amplificadores EDFA ao longo do percurso.

Com isso, foram postas três propostas em relação aos componentes. Na primeira, não-otimizada, especificam-se os componentes para o pior caso (maior alcance, transceptores de máximo desempenho, maior potência de saída de transmissão e menor sensibilidade de recepção) e replicou-se esta escolha a todas as demais conexões. Tal abordagem, além de gerar um custo final mais elevado, pode também fazer com que ocorra a saturação do fotodetector em alguns casos. Tomando como base a primeira proposta, desenvolveu-se uma proposta otimizada, na qual foram especificados os componentes de acordo com a potência necessária, buscando reduzir ao máximo os superdimensionamentos vistos na proposta anterior. Contudo, mesmo para esta proposta, foram observados caminhos com excesso de potência, sendo sugerido o emprego de atenuadores fixos para atenuar o sinal.

A terceira abordagem, a contraproposta otimizada, teve como objetivo atender ao orçamento de potência pelo aumento do ganho dos amplificadores, diminuindo a margem de potência obtida pelo desempenho dos transceptores. Com base nas três sugestões, foi feito o levantamento dos custos relativos aos componentes utilizados em cada abordagem do projeto. A segunda proposta, além de ser a mais indicada em termos de desempenho, foi

a que apresentou o menor custo final, sendo este R\$ 119.822,64. Entretanto, salienta-se que, através da adoção de algumas medidas na implantação da rede, como fusões e conectores de qualidade, este valor pode ser ainda menor.

Por se tratar de uma rede de longa distância contendo caminhos alternativos, invariavelmente, a quantidade de cabos necessária é elevada. Esta elevada quantidade de cabos gerou um custo elevado, que foi contornado pelo uso de um cabo óptico com 12 fibras monomodo em seu interior, o que possibilita o aluguel ou venda das fibras ociosas para outras instituições ou empresas. Com esta estratégia, o custo é dividido proporcionalmente entre todos os usuários das fibras. De um total de R\$ 3.790.742,64 em fibra, o investimento por parte da UNIPAMPA seria de R\$ 611.820,00, pelo uso de 2 das 12 fibras e aquisição de todos os componentes da camada física da rede. Utilizando estimativas para levantar os custos com os componentes da camada lógica, e também o custo operacional da rede, foi concluído que o investimento total da rede proposta ficaria em torno de R\$ 7.766.668,02. Considerando uma parcela anual de R\$ 400.000,00, valor gasto atualmente pela instituição para a obtenção destes serviços, a rede proposta seria quitada em aproximadamente 20 anos.

Desta forma, considera-se então que, através deste trabalho, foi possível comprovar que o investimento em uma topologia de rede própria traz vários benefícios para a instituição, tanto em aspecto técnico, quanto no âmbito econômico. Dado que, a infraestrutura proposta, dada a capacidade de transmissão de cada fibra, servirá de suporte à instituição por muito tempo. Outro fator importante, que deve ser destacado, é que os contratos de prestação de serviços de dados são, usualmente, curtos, e que a cada novo contrato (ou mesmo dentro do próprio contrato vigente) podem ser previstos reajustes, os quais resultariam em uma redução do retorno do investimento.

Os resultados obtidos no presente trabalho abrem caminhos para trabalhos futuros, como a especificação dos componentes a serem utilizados em cada nó e o aperfeiçoamento das técnicas de multiplexação e modulação da rede proposta, no intuito de agregar flexibilidade e escalabilidade e reduzir os custos de instalação da rede óptica.

# Referências

ZTT do Brasil. [S.l.: s.n.]. Citado na página 25.

ARAÚJO, D. R. B. de. *Planejamento de Redes Ópticas Usando Inteligência Computacional e Ciência das Redes*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Pernambuco, 2015. Citado 2 vezes nas páginas 21 e 30.

BANNISTER L. FRATTA, M. G. J. A. Topological design of the wavelength-division optical network. In: *INFOCOM '90, Ninth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communication Societies. The Multiple Facets of Integration. Proceedings, IEEE*. [S.l.: s.n.], 1990. p. 1005–1013 vol.3. Citado na página 21.

BRACKETT, C. A. et al. A scalable multiwavelength multihop optical network: a proposal for research on all-optical networks. *Journal of Lightwave Technology*, v. 11, n. 5, p. 736–753, May 1993. ISSN 0733-8724. Citado na página 21.

BRASIL, Z. do. *ZTTl*. 2017. Available in <http://www.zttcable.com.br/>, último acesso em Junho de 2017. Citado 2 vezes nas páginas 54 e 55.

CO., L. H. F. O. E. *FullWell*. 2017. Available in <http://www.fullwell.com/>, último acesso em Junho de 2017. Citado na página 49.

GIGALIGHT, L. *Gigalight*. 2006. Available in <http://www.gigalight.com/>, último acesso em Junho de 2017. Citado na página 49.

GROUP, F. E. *Furukawa*. 2017. Available in <http://www.furukawatam.com/br/>, último acesso em Junho de 2017. Citado na página 54.

HECHT, J. *How Charles Kao Beat Bell Labs to the Fiber-Optic Revolution*. 2016. Available in <http://spectrum.ieee.org/tech-talk/telecom/internet/how-charles-cao-beat-bell-labs-to-the-fiber-optic-revolution>, último acesso em Outubro de 2016. Citado na página 21.

INC., L. E. T. *Eoptolink*. 2017. Available in <http://www.eoptolink.com/>, último acesso em Junho de 2017. Citado 3 vezes nas páginas 15, 48 e 49.

KAO, K. C.; HOCKHAM, G. A. Dielectric-fibre surface waveguides for optical frequencies. *IEE Proceedings J - Optoelectronics*, v. 133, n. 3, p. 191–198, June 1986. ISSN 0267-3932. Citado na página 21.

KEISER, G. *Optical Fiber Communications*. 4th. ed. New York: McGraw-Hill Global Education Holdings, 2014. Citado 17 vezes nas páginas 21, 22, 25, 26, 27, 28, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 41, 43, 45 e 46.

LETIĆ, V.; AVDAGIĆ, Z.; BOŠKOVIC, D. Optimization of ring-star transmission problem in telecommunication systems based on ant colony algorithms. In: *Information and Communication Technology, Electronics and Microelectronics (MIPRO), 2015 38th International Convention on*. [S.l.: s.n.], 2015. p. 1245–1249. Citado 2 vezes nas páginas 21 e 30.

- LTDA, C. do B. *Cablona*. 2017. Available in <http://www.cablona.com.br/pt/>, último acesso em Junho de 2017. Citado na página 54.
- MAESSCHALCK, S. D. et al. Pan-european optical transport networks: An availability-based comparison. *Photonic Network Communications*, v. 5, n. 3, p. 203–225, 2003. ISSN 1572-8188. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1023/A:1023088418684>>. Citado 4 vezes nas páginas 15, 21, 28 e 29.
- MARTINI, J. A. *Proposta de Rede Óptica de Interconexão para Arquitetura a Fluxo de Dados*. Tese (Doutorado) — Instituto de Física de São Carlos - Universidade de São Paulo, 1999. Citado na página 21.
- MUKHERJEE, B. et al. Some principles for designing a wide-area wdm optical network. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, v. 4, n. 5, p. 684–696, Oct 1996. ISSN 1063-6692. Citado na página 21.
- SIMMONS, J. M. *Optical Network Design and Planning*. 1th. ed. New York: Springer Science+Business Media, 2008. Citado 3 vezes nas páginas 49, 55 e 56.

# Anexos



Tabela 13 – Lista de transceptores utilizados.

|   | Referência do produto | PT | Valor unitário R\$ | Fabricante |
|---|-----------------------|----|--------------------|------------|
| 1 | EOLS-1512-40          | 21 | 90,16              | Eoptolink  |
| 2 | EOLS-1512-60          | 25 | 96,60              | Eoptolink  |
| 3 | EOLS-1512-80          | 27 | 109,48             | Eoptolink  |
| 4 | EOLS-1512-100         | 31 | 144,90             | Eoptolink  |
| 5 | EOLS-1512-120         | 35 | 173,88             | Eoptolink  |
| 6 | EOLS-1512-160         | 42 | 209,30             | Eoptolink  |

Tabela 14 – Lista de amplificadores EDFA utilizados.

|    | Referência do produto | Ganho (dB) | Valor unitário R\$ | Fabricante |
|----|-----------------------|------------|--------------------|------------|
| 1  | FWA-1550L - 5         | 20         | 3.381,00           | Fullwell   |
| 2  | FWA-1550L - 6         | 21         | 3.413,20           | Fullwell   |
| 3  | FWA-1550L - 7         | 22         | 3.445,40           | Fullwell   |
| 4  | FWA-1550L - 8         | 23         | 3.477,60           | Fullwell   |
| 5  | FWA-1550L - 9         | 24         | 3.509,80           | Fullwell   |
| 6  | FWA-1550L - 10        | 25         | 3.542,00           | Fullwell   |
| 7  | FWA-1550L - 11        | 26         | 3.709,44           | Fullwell   |
| 8  | FWA-1550L - 12        | 27         | 3.876,88           | Fullwell   |
| 9  | FWA-1550L - 13        | 28         | 4.044,32           | Fullwell   |
| 10 | FWA-1550L - 14        | 29         | 4.211,76           | Fullwell   |
| 11 | FWA-1550L - 15        | 30         | 4.379,20           | Fullwell   |
| 12 | FWA-1550L - 16        | 31         | 4.546,64           | Fullwell   |
| 13 | FWA-1550L - 17        | 32         | 4.714,08           | Fullwell   |
| 14 | FWA-1550L - 18        | 33         | 4.881,52           | Fullwell   |
| 15 | FWA-1550L - 19        | 34         | 5.048,96           | Fullwell   |
| 16 | FWA-1550L - 20        | 35         | 5.071,50           | Fullwell   |

Tabela 15 – Lista de fibras ópticas orçadas.

|   | Referência do produto     | Valor (R\$/m) | Fabricante             |
|---|---------------------------|---------------|------------------------|
| 1 | CFOA-SM-ASU120-12-NR      | 2,9717        | Furukawa               |
| 2 | CFOA-SM-AS120-S 12F TS NR | 2,123         | Cablina do Brasil LTDA |
| 3 | CFOA-SM-ASU-120-RA-012-NR | 1,98          | ZTT DO BRASIL LTDA     |