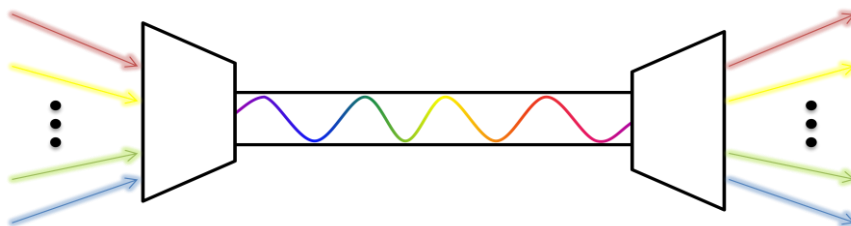


INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA
Área Departamental de Engenharia de Electrónica e
Telecomunicações e de Computadores



Redução das emissões de CO₂ em redes ópticas

Carlos Eduardo da Costa António Silva

(Licenciado em Engenharia de Electrónica e Telecomunicações e de
Computadores)

Trabalho Final de Mestrado para Obtenção do Grau de Mestre em Engenharia de
Electrónica e Telecomunicações

Orientador(es):

Prof. Doutor Pedro R. T. Pinho
Prof. Fernando M. V. Ramos

Júri:

Presidente: Prof. Doutor Mário P. Véstias

Vogais:

Prof. Doutor António L. J. Teixeira
Prof. Doutor Pedro R. T. Pinho

Dezembro de 2011

Agradecimentos

Queria deixar um agradecimento especial a quem me deu suporte, pois sem ele este trabalho não seria possível realizar-se:

Prof. Doutor Pedro Pinho

Prof. Fernando Ramos

Família

E amigos

Abstract

In a world where telecommunication networks are in constant growth and evolution, the energy consumption of these networks also increases. With its development, the cost of implementing a telecommunication network is reduced to a point where the major setback to its growth is the cost of maintenance and operation. In the last decades efforts have been made in order to make networks more energy-efficient, thus reducing its operating costs, but also reducing the problems related to the sources of energy that supply these networks. The main objective of this work is the study of energy-efficient IP over WDM networks, we formulate an optimization model and evaluate it, using different network topologies. The energy-consumption analysis of the different topologies shows that in most cases it is possible to obtain a reduction of energy consumption of around 25%, in average.

Resumo

Num mundo em que as redes de telecomunicações estão em constante evolução e crescimento, o consumo energético destas também aumenta. Com a evolução tanto por parte das redes como dos seus equipamentos, o custo de implementação de uma rede tem-se reduzido até ao ponto em que o maior obstáculo para o crescimento das redes é já o seu custo de manutenção e funcionamento. Nas últimas décadas têm sido criados esforços para tornar as redes cada vez mais eficientes ao nível energético, reduzindo-se assim os seus custos operacionais, como também a redução dos problemas relacionados com as fontes de energia que alimentam estas redes. Neste sentido, este trabalho tem como objectivo principal o estudo do consumo energético de redes IP sobre WDM, designadamente o estudo de métodos de encaminhamento que sejam eficientes do ponto de vista energético. Neste trabalho formalizámos um modelo de optimização que foi avaliado usando diferentes topologias de rede. O resultado da análise mostrou que na maioria dos casos é possível obter uma redução do consumo na ordem dos 25%.

Índice

Índice de Figuras	ix
Índice de Tabelas.....	xi
Lista de Acrónimos	xiii
Capítulo 1: Introdução e Motivação.....	1
1.1 Esforços no caminho da eficiência energética	2
1.2 Porquê o IP sobre WDM	5
1.3 Objectivos e metodologias da dissertação.....	5
1.4 Organização da dissertação	6
Capítulo 2: Redes de Telecomunicações Ópticas.....	7
2.1 Camada lógica.....	8
2.1.1 IP e TCP	8
2.1.2 Cabeçalho IP	9
2.1.3 Routers IP.....	11
2.1.4 Engenharia de tráfego.....	11
2.1.4.1 Qualidade de serviço	11
2.1.4.2 Encaminhamento	14
2.1.5 Encaminhamento na Internet.....	19
2.1.4.1 Encaminhamento Intra-domínio.....	20
2.1.4.2 Encaminhamento Inter-domínio.....	20
2.2 Camada física	21
2.2.1 Topologias de redes.....	21
2.2.2 Comutação.....	21
2.2.3 Redes Ópticas	23
2.2.3.1 Fibra Óptica.....	23
Atenuação.....	24
Dispersão.....	26
Efeitos não lineares	27

2.2.3.2 Emissores e receptores	29
2.2.4 <i>Wavelength Division Multiplexing</i>	31
2.2.4.1 Amplificadores e repetidores.....	33
2.2.4.2 Optical Add/Drop Multiplexer	34
2.2.4.3 Optical Crossconnect.....	35
2.2.4.4 Transponder.....	35
2.3 IP sobre WDM	36
2.3.1 IP sobre WDM ponto-a-ponto.....	36
2.3.2 IP sobre WDM reconfigurável	36
2.3.3 IP sobre WDM comutável.....	37
Capítulo 3: Modelo de otimização energético para redes ópticas	39
3.1 Variáveis e parâmetros do modelo	40
3.2 Objectivo e restrições do modelo	42
Capítulo 4: Avaliação do modelo de otimização.....	45
Parâmetros dos modelos.....	46
Topologias em anel	47
Topologias em estrela	50
Topologias híbridas.....	53
Topologia em malha.....	56
Redes NSFNET	60
Capítulo 5: Conclusões	63
Trabalho futuro.....	64
Referências	65

Índice de Figuras

Figura 1 – Previsão do consumo energético nas redes de telecomunicações [1, 2].	1
Figura 2 – Topologia/camada física e lógica.	7
Figura 3 – Modelo TCP/IP e as suas respectivas camadas. [30]	8
Figura 4 – Cabeçalho do IPv4. [32]	10
Figura 5 – Cabeçalho do IPv6. [32]	11
Figura 6 – Exemplo da técnica FIFO.	12
Figura 7 – Exemplo da técnica <i>priority queuing</i> .	12
Figura 8 – Exemplo da técnica <i>custom queuing</i> .	13
Figura 9 – Exemplo de uma lista de espera WFQ.	13
Figura 10 – Rede de 4 nós.	14
Figura 11 – Mapa de seis nós para o exemplo do algoritmo de Dijkstra.	15
Figura 12 – Primeiro passo do algoritmo de Dijkstra.	16
Figura 13 – Segundo passo do algoritmo de Dijkstra.	16
Figura 14 – Terceiro passo do algoritmo de Dijkstra.	17
Figura 15 – Quarto passo do algoritmo de Dijkstra.	17
Figura 16 – Quinto passo do algoritmo de Dijkstra.	18
Figura 17 – Sexto passo do algoritmo de Dijkstra.	19
Figura 18 – Composição simplista da Internet.	19
Figura 19 – Três principais tipos de rede.	21
Figura 20 – Conceito básico da transmissão sobre fibra óptica.	24
Figura 21 – Atenuação e suas componentes na fibra óptica. [42]	25
Figura 22 – Terceira janela de funcionamento operacional da fibra óptica. [43]	25
Figura 23 – Interferência intersimbólica. [30]	26
Figura 24 – Efeito da dispersão de polarização. [44]	26
Figura 25 – Criação da onda de <i>Stokes</i> .	27
Figura 26 – Acumulação das várias ondas de <i>Stokes</i> .	28
Figura 27 – Dispersão estimulada de <i>Raman</i> . Baseado em [43]	28
Figura 28 – Efeito não linear de auto-modulação de fase. Baseado em [43]	29
Figura 29 – Sobreposição do espectro.	29
Figura 30 – Reflexão e transmissão utilizando as faces de uma cavidade <i>Fabry-Perot</i> . [43]	30
Figura 31 – Diagrama de blocos de um receptor óptico. [43]	30
Figura 32 – Princípio básico da fotodeteção utilizando um semiconductor. [43]	31
Figura 33 – Exemplo de uma rede WDM que proporciona caminhos de luz aos seus utilizadores. [43]	32

Figura 34 – Amplificador EDFA. Baseado em [29]	33
Figura 35 – <i>Optical Add/Drop Multiplexer</i> (OADM). Baseado em [29]	34
Figura 36 – <i>Optical Crossconnect</i> (OXC). Baseado em [29].....	35
Figura 37 – IP sobre WDM ponto-a-ponto. Baseado em [29]	36
Figura 38 – IP sobre WDM reconfigurável. Baseado em [29].....	37
Figura 39 – IP sobre WDM comutável. Baseado em [29]	38
Figura 40 – Arquitectura da rede IP sobre WDM do modelo utilizado. Baseado em [3].	40
Figura 41 – Rede em anel com 5 nós e 5 ligações.	47
Figura 42 – Consumo energético da rede em anel com 5 nós e 5 ligações.	47
Figura 43 – Rede em anel com 9 nós e 9 ligações.	48
Figura 44 – Consumo energético da rede em anel com 9 nós e 9 ligações.	49
Figura 45 – Rede em estrela com 5 nós e 4 ligações.....	50
Figura 46 – Consumo energético da rede em estrela com 5 nós e 4 ligações.	50
Figura 47 – Rede em estrela com 9 nós e 8 ligações.....	51
Figura 48 – Consumo energético da rede em estrela com 9 nós e 8 ligações.	52
Figura 49 – Rede híbrida com 5 nós e 8 ligações.....	53
Figura 50 – Consumo energético da rede híbrida com 5 nós e 8 ligações.	53
Figura 51 – Rede de teste híbrida com 9 nós e 16 ligações.....	54
Figura 52 – Consumo energético da rede híbrida com 9 nós e 16 ligações.	55
Figura 53 – Rede de teste em malha com 5 nós e 6 ligações.	56
Figura 54 – Consumo energético da rede em malha com 5 nós e 6 ligações.	56
Figura 55 – Rede de teste em malha com 9 nós e 12 ligações.	57
Figura 56 – Consumo energético da rede em malha de 9 nós e 12 ligações.	58
Figura 57 – Rede NSFNET, com as respectivas distâncias entre nós, em km. Baseado em [3]. 60	
Figura 58 – Consumo energético da rede NSFNET.....	61

Índice de Tabelas

Tabela 1 – Definição das diferentes camadas do modelo TCP/IP. [29].....	9
Tabela 2 – Tabela de encaminhamento inicial para o exemplo do algoritmo de Dijkstra.....	15
Tabela 3 – Primeira actualização da tabela de encaminhamento para o exemplo do algoritmo de Dijkstra.....	16
Tabela 4 – Segunda actualização da tabela de encaminhamento para o exemplo do algoritmo de Dijkstra.....	17
Tabela 5 – Terceira actualização da tabela de encaminhamento para o exemplo do algoritmo de Dijkstra.....	18
Tabela 6 – Quarta actualização da tabela de encaminhamento para o exemplo do algoritmo de Dijkstra.....	18
Tabela 7 – Quinta actualização da tabela de encaminhamento para o exemplo do algoritmo de Dijkstra.....	19
Tabela 8 – Comutação por circuito, pacote e célula. [29].....	23
Tabela 9 – Valores do consumo energético da rede com anel de 5 nós e 5 ligações.	48
Tabela 10 – Valores do consumo energético da rede em anel com 9 nós e 9 ligações.	49
Tabela 11 – Valores do consumo energético da rede em estrela com 5 nós e 4 ligações.	51
Tabela 12 – Valores do consumo energético da rede em estrela com 9 nós e 8 ligações.	52
Tabela 13 – Valores do consumo energético da rede híbrida com 5 nós e 8 ligações.	54
Tabela 14 – Valores do consumo energético da rede híbrida com 9 nós e 16 ligações.	55
Tabela 15 – Valores do consumo energético da rede em malha com 5 nós e 6 ligações.	57
Tabela 16 – Valores do consumo energético da rede em malha de 9 nós e 12 ligações.	58
Tabela 17 – Número de equipamento com consumo energético para a rede em anel com 5 nós.	59
Tabela 18 – Número de equipamento com consumo energético para a rede em estrela com 5 nós.	59
Tabela 19 – Número de equipamento com consumo energético para a rede híbrida com 5 nós.	59
Tabela 20 – Número de equipamento com consumo energético para a rede em malha com 5 nós.	60
Tabela 21 – Valores do consumo energético da rede NSFNET.....	61
Tabela 22 – Síntese percentual dos ganhos obtidos para todas as topologias.	64

Lista de Acrónimos

AS	– <i>Autonomous System;</i>
ATIS	– <i>Alliance for Telecommunications Industry Solutions;</i>
ATM	– <i>Asynchronous Transfer Mode;</i>
BGP	– <i>Border Gateway Protocol;</i>
CWDM	– <i>Coarse wavelength division multiplexing;</i>
DARPA	– <i>Defense Advanced Research Projects Agency;</i>
DSCP	– <i>Differentiated Services Code Point;</i>
DSL	– <i>Digital Subscriber Line;</i>
DWDM	– <i>Dense wavelength division multiplexing;</i>
E-BGP	– <i>Exterior Border Gateway Protocol;</i>
ECN	– <i>Explicit Congestion Notification;</i>
ECR	– <i>Energy Consumptions Rating;</i>
EDFA	– <i>Erbium Doped Fiber Amplifiers;</i>
EIATRACK	– <i>Environmental Intelligence Analysis;</i>
ETSI	– <i>European Telecommunication Standard Institute;</i>
FDM	– <i>Frequency Division Multiplexing;</i>
FIFO	– <i>First-In, First-Out;</i>
GPON	– <i>Gigabit Passive Optical Network;</i>
I-BGP	– <i>Interior Border Gateway Protocol;</i>
IDRP	– <i>Inter-Domain Routing Protocol</i>
IEEE	– <i>Institute of Electrical and Electronics Engineers;</i>
ILD	– <i>Injection Laser Diode;</i>
IP	– <i>Internet Protocol;</i>
IPv4, IPv6	– <i>Internet Protocol versão 4 e versão 6;</i>
IPX	– <i>Internetwork Packet Exchange</i>
IS-IS	– <i>Intermediate System To Intermediate System;</i>
ISO	– <i>International Organization for Standardization;</i>
ISP	– <i>Internet Service Provider;</i>
ITU	– <i>International Telecommunication Union;</i>
ITU-T	– <i>ITU Telecommunication Standardization Sector;</i>
LAN	– <i>Local Area Network;</i>
LASER	– <i>Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation</i>
LED	– <i>Light-Emitting Diode;</i>
LR-PON	– <i>Long Reach Passive Optical Network;</i>

MILP	– <i>Mixed Integer Linear Programming;</i>
MILP	– <i>Mixed Integer Linear Programming;</i>
NIPP	– <i>Network Interface, Power, and Protection Committee;</i>
OADM	– <i>Optical Add/Drop Multiplexer;</i>
ONU	– <i>Optical Network Unit;</i>
OSI	– <i>Open Systems Interconnection;</i>
OSPF	– <i>Open Shortest Path First;</i>
OXC	– <i>Optical Crossconnect;</i>
PAN	– <i>Personal Area Network;</i>
PDFA	– <i>Praseodymium-Doped Fiber Amplifier;</i>
PON	– <i>Passive Optical Network;</i>
RFC	– <i>Request for Comments;</i>
SOA	– <i>Semiconductor Optical Amplifier;</i>
SPF	– <i>Shortest Path First;</i>
TCP	– <i>Transmission Control Protocol;</i>
TDM	– <i>Time Division Multiplexing;</i>
TEEER	– <i>Energy Efficiency Requirements for Telecommunications Equipment;</i>
TIA	– <i>Telecommunications Industry Association;</i>
TIC	– <i>Tecnologias da Informação e Comunicação;</i>
UDP	– <i>User Datagram Protocol;</i>
WDM	– <i>Wavelength Division Multiplexing;</i>

Capítulo 1: Introdução e Motivação

As redes de telecomunicações tal como as conhecemos nos dias de hoje, surgiram em meados dos anos 60 e 70 com o intuito de partilhar periféricos, tais como discos externos ou impressoras. Desde essa altura as redes têm evoluído utilizando todo o tipo de sistemas de transmissão (cabo de cobre, fibra óptica, satélite, ondas rádio, etc.), sendo que na actualidade estes sistemas operam vários tipos de serviços, como por exemplo, texto, voz e vídeo.

O crescimento das redes de comunicações e a sua evolução deram origem à maior rede do mundo, a Internet, que tem visto o seu tráfego crescer a um ritmo de 50% a 60% ao ano [1], forçando as operadoras a aumentarem a capacidade e a dimensão das suas infra-estruturas. No entanto, o crescente aumento das redes levanta uma questão importante: qual é o desempenho, ao nível do consumo energético destas redes, à medida que estas se expandem? A Figura 1 ajuda a responder a esta questão, demonstrando um preocupante crescimento do consumo energético, nas redes de telecomunicações em função dos anos.

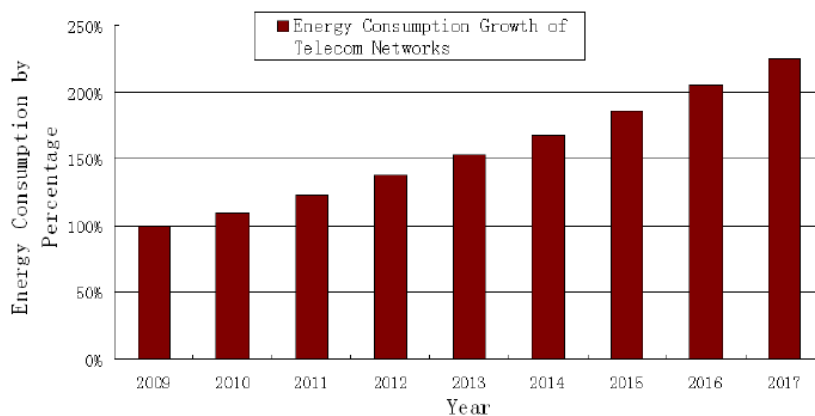


Figura 1 – Previsão do consumo energético nas redes de telecomunicações [1, 2].

O aumento do consumo energético nas redes de telecomunicações tem várias consequências nefastas, sendo que parte destas está relacionada com os recursos utilizados como fontes de geração de energia. Os recursos utilizados em centrais de energia são maioritariamente combustível fóssil e mineral (carvão, petróleo e gás), urânio e tório. O uso destes recursos tem três grandes desvantagens. A primeira é a geração de poluição por parte dos recursos fósseis e minerais, implicando problemas ambientais como a poluição do ar, nuvens tóxicas, chuvas ácidas e afins. A segunda desvantagem é o eminente perigo e risco de colapso das centrais nucleares. Por último, todos os recursos mencionados anteriormente não são renováveis, ou seja, têm um fim à vista e podem criar conflitos político-económicos, o que provoca entre outras coisas o aumento dos custos da energia, em particular para o cliente final. Uma das soluções para estes problemas passa pela substituição de energias não renováveis por energias renováveis, tais como o sol, água, vento, entre outras. No entanto estas fontes renováveis têm limitações, como por exemplo a existência de vento ou sol. Devido a estas razões, são necessárias novas soluções, que passam pelo desenvolvimento de componentes, equipamentos e sistemas mais eficientes energeticamente. Um exemplo, ao nível doméstico, é o incentivo à substituição das antigas lâmpadas de filamentos por lâmpadas de baixo consumo, ou a utilização de electrodomésticos de classe energética mais eficiente.

A área das telecomunicações não é excepção, de tal forma que vários grupos de investigação, com destaque para os autores de [3], defendem que mais tarde ou mais cedo, o crescimento da Internet vai ser limitado não pelo custo do equipamento, mas sim pelo custo do consumo do equipamento. Nos últimos anos têm sido propostas varias soluções para reduzir o seu consumo, denominadas de “soluções verdes”. Exemplos destas soluções são a substituição das redes que utilizam cabos de cobre entrelaçado ou cabo coaxial por redes de fibra óptica, dada a elevada eficiência energética, destas últimas. Também existem esforços no sentido de desenvolver componentes, equipamento, novas arquitecturas e novas metodologias de encaminhamento de tráfego que reduzam o consumo energético. O estudo apresentado nesta dissertação baseia-se neste último ponto.

1.1 Esforços no caminho da eficiência energética

Esta evolução num sentido mais “verde” começou com a sugestão de estratégias para a redução do consumo energético nas redes de telecomunicações através de métodos para “adormecer” componentes quando a carga de tráfego na rede é baixa [4], métodos esses, que tiveram uma grande aceitação por parte de vários organismos e entidades, tais como: ITU (*International Telecommunication Union*), IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*), ETSI (*European Telecommunication Standard Institute*), TIA (*Telecommunications Industry Association*), ATIS (*Alliance for Telecommunications Industry Solutions*), ECR

(*Energy Consumptions Rating*), TEEER (*Energy Efficiency Requirements for Telecommunications Equipment*), etc. [5]

De entre as inúmeras iniciativas verdes destas entidades, destacam-se as seguintes:

- Ⓢ A ITU tem organizado conferências sobre as TIC (Tecnologias da Informação e Comunicação) e as alterações climáticas [6]. Estas conferências têm tido a participação de todo o tipo de especialistas, desde engenheiros, designers, oficiais governamentais, planeadores, reguladores, entre outros. A ITU também tem um grupo de estudo, o *Study Group - 15*, com o intuito de desenvolver técnicas de conservação de energia em rede DSL (*Digital Subscriber Line*) e PON (*Passive Optical Network*), visto serem estas as tecnologias com maior consumo energético à escala mundial.
- Ⓢ O IEEE está a desenvolver a norma IEEE P802.3az [7], cujos objectivos são a definir mecanismos que reduzam o consumo energético durante períodos de baixa utilização, através de protocolos que consigam coordenar as transições de e para estados de baixo consumo energético.
- Ⓢ O ETSI desenvolveu uma “agenda verde” com o objectivo de implementar as normas ISO (*International Organization for Standardization*) 14001:2004 e 14004:2004 [8]. Nesta “agenda verde” estão incluídas normas como: “DTR/EE-00002” para a redução do consumo energético por parte de equipamento e infra-estruturas de telecomunicações; “DTR/EE-00004” para a utilização de energias alternativas em instalações de telecomunicações; “DTR/EE-00005” sobre o consumo energético por parte de equipamentos de banda larga de redes de telecomunicações; “DTR/EE-00006” sobre as considerações ambientais referentes a equipamentos instalados fora de edifícios, ou seja, ao ar livre; e “DTR/EE-00007” sobre a eficiência energética de equipamento de redes sem fios.
- Ⓢ A TIA iniciou em 2008 uma “iniciativa verde” denominada de EIATRACK (*Environmental Intelligence Analysis*), [9]. Esta iniciativa foi criada para ajudar empresas a desenvolver estratégias de crescimento e com consciência ambiental em novos mercados. A EIATRACK é uma ferramenta que ajuda a navegar através das regulações e legislações ambientais das principais regiões da Europa, Ásia Pacífico, América do Norte e América do Sul.

A nível científico, nos últimos anos inúmeros grupos de investigação têm apresentado os mais variados estudos para tornar as redes mais “verdes”:

- ⊗ Desligar ou adormecer equipamento e caminhos ópticos quando o tráfego é baixo [10, 11, 12], sendo que este tipo de soluções necessita de protocolos que coloquem o equipamento num estado inactivo, sem que seja comprometido o consumo energético nem a qualidade do serviço [13]. Existem também normas da ITU-T (*ITU Telecommunication Standardization Sector*), como a ITU-T G.su45 [14], para conservação de energia em equipamentos GPON (*Gigabit Passive Optical Network*), para estes passarem para um estado inactivo. Em [15] e [16] são apresentadas mais técnicas de inactividade de equipamento em redes TDM-PON ONU (*Time Division Multiplexing – Passive Optical Network*).
- ⊗ A utilização de novas arquitecturas, tais como a LR-PON (*Long Reach Passive Optical Network*), para aumentar a distância que as PON suportam de 20 km para 100 km, recorrendo a amplificadores ópticos e tecnologias WDM (*Wavelength Division Multiplexing*) [17]. O LR-PON tenta agregar várias centrais remotas numa só, de forma a reduzir o consumo energético das futuras redes de acesso. Para aumentar a eficiência energética, ainda é possível desenvolver estas redes de forma que a atribuição dos caminhos ópticos seja dinâmica [18].
- ⊗ Aplicação de técnicas de encaminhamento e agregação de tráfego como o *traffic grooming* [19-24]. Ou seja, a agregação de circuitos de baixo débito em circuitos de alto débito, possibilitando que num só nó seja efectuada a multiplexagem de diferentes caminhos de luz de baixo débito, optimizando o número de caminhos de luz activos na rede.
- ⊗ Para além do *traffic grooming*, outra técnica importante de optimização é o *bypass* óptico. Este consiste em permitir que certos comprimentos de onda não necessitem de processamento electrónico no nó que atravessam. A grande vantagem desta técnica é a redução do número de conversões óptico-eléctrico-óptico, minimizando assim o consumo energético por parte destas redes [3].
- ⊗ Outra técnica para reduzir o consumo energético é a utilização de novos protocolos de encaminhamento [25, 26], ou adaptação dos existentes, como o OSPF (*Open Shortest Path First*) [27], para que o encaminhamento feito pelos nós tenha em atenção a energia que alimenta os componentes nos diferentes nós.
- ⊗ Existe também a opção da utilização de energias renováveis nas redes de telecomunicações [28]. Esta opção é muito apreciada, pois leva a que os operadores de telecomunicações possam aumentar a dimensão das suas redes de uma forma ambientalmente neutra.

1.2 Porquê o IP sobre WDM

O IP (*Internet Protocol*) é o protocolo que permite a convergência na Internet à escala global. Este é um protocolo de camada 3 e é projectado para lidar com a interoperabilidade das redes e o encaminhamento em níveis de sub-redes diferentes, permitindo a utilização de tecnologias nas diversas camadas superiores e inferiores. As camadas superiores contêm uma grande variedade de serviços baseados em IP, uma grande parte dos quais ainda estão em evolução e outros em desenvolvimento. Um exemplo é a interconexão de uma variada gama de equipamentos em redes domésticas, tais como multifunções, computadores portáteis, telemóveis, etc. Quanto às camadas inferiores, existe uma convergência para a utilização de fibra óptica através dos sistemas WDM (*Wavelength Division Multiplexing*). Esta convergência deve-se ao facto da tecnologia óptica oferecer uma enorme capacidade, que é capaz de sustentar o contínuo crescimento da Internet. A motivação para o desenvolvimento do IP sobre WDM pode ser resumida da seguinte forma [29]:

- ⊙ As redes ópticas WDM conseguem não só lidar com o contínuo crescimento do tráfego da Internet explorando as infra-estruturas existentes, como também aumentar significativamente a eficiência destas infra-estruturas.
- ⊙ Grande parte do tráfego de dados existente actualmente é tráfego IP, na qual até a voz pode ser convertida utilizando técnicas de “voz sobre IP”.
- ⊙ O IP sobre WDM herda a flexibilidade e a adaptabilidade do protocolo IP, permitindo alcançar maiores débitos para aplicações “*on-demand*”, bem como obter a interoperabilidade entre outros serviços e equipamentos existentes.
- ⊙ Por último, já existe a experiência de anteriores integrações do IP com outras tecnologias (exemplo: IP com ATM (*Asynchronous Transfer Mode*)), podem facilitar a integração do IP com WDM.

1.3 Objectivos e metodologias da dissertação

Esta dissertação tem como objectivo o estudo da eficiência energética em redes IP sobre WDM, optimizando o seu funcionamento, reduzindo a quantidade de equipamento activo e alterando a forma como é efectuado o encaminhamento do tráfego, tentando reduzir os custos energéticos destas redes. Serão estudadas diferentes topologias de rede e com diferentes perfis de tráfego, com o intuito de minimizar o seu custo energético. Para tal, recorreu-se à utilização de técnicas de optimização baseadas em programação linear, mais propriamente programação MILP (*Mixed Integer Linear Programming*). Foi implementado e avaliado um modelo de optimização do encaminhamento na rede em função do consumo energético dos seus componentes.

1.4 Organização da dissertação

Esta dissertação está dividida em cinco capítulos. Depois desta introdução, no capítulo 2 são introduzidos e explicados alguns dos conceitos base do IP e de rede ópticas, onde são abordados temas como o protocolo IP, a engenharia de tráfego, o encaminhamento na Internet, algumas características das redes ópticas e as arquitecturas IP sobre WDM. De seguida, no capítulo 3 é apresentado o modelo MILP implementado, explicando o objectivo, as restrições e as variáveis deste modelo. No capítulo 4 são apresentados, comentados e comparados os resultados obtidos para as diferentes topologias de rede implementados. No capítulo 5 são apresentadas as principais conclusões deste trabalho.

Capítulo 2: Redes de Telecomunicações

Ópticas

Este capítulo está dividido em duas partes, uma ligada à componente e topologia lógica, (ou virtual) e outra à topologia física das redes. A primeira representa a forma como os diversos componentes da rede comunicam entre si, ou seja, descreve como é que o tráfego circula na rede. A segunda está associada aos componentes físicos da rede, ou seja, como são conectados os equipamentos e como é efectuada a comunicação no meio de transmissão, ou seja, a verdadeira disposição física da rede. A Figura 2 é um exemplo de uma rede na qual a topologia física é composta por quatro comutadores (1, 2, 3 e 4) conectados através de um anel físico e a topologia lógica é composta por quatro routers (A, B, C e D) ligados virtualmente em malha. Nesta figura pode verificar-se, por exemplo, que existe tráfego a circular entre A e C directamente, ou seja, com origem em A e destino em C e vice-versa. No entanto não existe uma ligação física correspondente, sendo que o tráfego é enviado de A para C através das ligações entre os comutadores 1, 2 e 3, ou 1, 4 e 3.

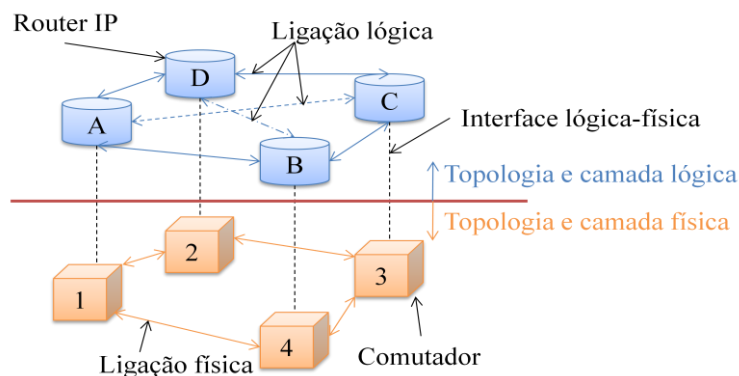


Figura 2 – Topologia/camada física e lógica.

2.1 Camada lógica

A camada lógica é uma parte integrante das redes de telecomunicações e como tal, é necessário perceber alguns dos seus conceitos, sendo que nesta secção, serão abordados temas como o protocolo de Internet, a engenharia de tráfego e o encaminhamento na Internet.

2.1.1 IP e TCP

O IP é um protocolo de comunicação que não garante a entrega, nem a entrega ordenada, da informação, sendo necessário outro protocolo que desse essas garantias, neste caso o TCP. Ambos os protocolos foram criados e desenvolvidos em conjunto pela DARPA (*Defense Advanced Research Projects Agency*) em meados dos anos 70. As primeiras redes TCP/IP surgiram no final dos anos 70 inícios de 80, sendo que estas, foram incluídas no sistema UNIX e como tal um vasto número de universidades começou a formar as suas próprias redes. Este modelo serviu como base para um dos maiores fenómenos na área das redes de telecomunicações, a Internet. A progressiva expansão da Internet levou ao desenvolvimento dos mais variados tipos de aplicações, tecnologias e protocolos, na qual, a maioria não era compatível entre si. O modelo TCP/IP está dividido em cinco camadas, física, lógica, rede, transporte e aplicação (Figura 3). A definição de cada camada pode ser visualizada na

Tabela 1. [29]

FTP HTTP SSH SMTP NFS SNMP	Applications
TCP UDP	Transport layer
IP	Network layer
Ethernet MAC PPP HDLC GFP RPR	Data link layer
Ethernet PHY Optical layer Coaxial/twisted pair cable OTN layer SONET layer	Physical layer

Figura 3 – Modelo TCP/IP e as suas respectivas camadas. [30]

Tabela 1 – Definição das diferentes camadas do modelo TCP/IP. [29]

Camada	Modelo OSI	Funcionalidade
7	Aplicação	Fornece protocolos do nível de aplicação (TELNET para terminais virtuais, FTP para transferência de ficheiros, SMTP para correio electrónico, SNMP para monitorização de rede, http para a procura de páginas da Web, etc.).
6	Apresentação	
5	Sessão	
4	Transporte	Concede serviços de comunicação ponto-a-ponto, da origem para o destino (TCP e UDP).
3	Rede	Proporciona uma camada de rede (virtual) que encaminha pacotes ou estabelece conexões ao longo da rede (ICMP, ARP, RARP, etc.).
2	Ligação lógica	Faculta a transferência de dados através da camada física de forma confiável, ou seja, existe sincronização de relógio e trama. Também controla o acesso à rede (protocolo MAC, etc.).
1	Física	Permite a transmissão de dados sobre um meio físico (ligação coaxial, óptica, cabo de Ethernet, etc.) e as definições de equipamento (amplificadores, repetidores, concentradores, etc.).

2.1.2 Cabeçalho IP

A primeira versão do IP é o IPv4 (*Internet Protocol version 4*). Um pacote IP é composto por um cabeçalho com 14 campos (Figura 4), seguido dos dados a transmitir. Os campos do cabeçalho são os seguintes: [31]

- Ⓢ *Version*: Indica qual é a versão do IP, se é o IPv4 ou o IPv6. Ocupa 4 bits.
- Ⓢ *Internet Header Length*: Indica a dimensão do cabeçalho. Ocupa 4 bits.
- Ⓢ *Type of Service*: É um campo que tem sido definido de forma diferente com a evolução das normas RFC (*Request for Comments*). Hoje em dia está definido como DSCP (*Differentiated Services Code Point*) e ECN (*Explicit Congestion Notification*). O DSCP serve para classificar o pacote, de forma a que este possa ter níveis de prioridade na transmissão. O ECN serve para indicar o nível de congestão da rede. O DSCP ocupa 6 bits e o ECN 2 bits.
- Ⓢ *Total Length*: Indica a dimensão total do pacote (cabeçalho + dados). Ocupa 16 bits.
- Ⓢ *Identification*: Indica a identificação do pacote. Ocupa 16 bits.
- Ⓢ *Flags*: Indica se o pacote pode ser fragmentado. Ocupa 3 bits.

- Ⓢ *Fragment Offset*: Indica o *offset* de um fragmento, na qual a sua unidade são blocos de 8 bytes. Ocupa 13 bits.
- Ⓢ *Time to Live*: É um contador que serve para evitar que o pacote circule pela rede indefinidamente, evitando o congestionamento da rede. Ocupa 8 bits.
- Ⓢ *Protocol*: Indica o protocolo usado na secção de dados. Ocupa 8 bits.
- Ⓢ *Header Checksum*: Serve para fazer a verificação de erros no cabeçalho. Ocupa 16 bits.
- Ⓢ *Source Address*: Contém o endereço IPv4 da origem. Ocupa 32 bits.
- Ⓢ *Destination address*: Contém o endereço IPv4 de destino. Ocupa 32 bits.
- Ⓢ *Options + Padding*: Campo de opções. Embora não sejam muito utilizadas, as opções mais comuns são o *Timestamp*, que é utilizado para os nós da rede adicionarem um marcador com precisão milimétrica; *Record Routing*, em que cada nó da rede por onde o pacote passa adiciona o seu endereço formando o caminho seguido pelo pacote e o *Source Routing*, que permite ao emissor definir o caminho que o pacote vai seguir. No total estas opções ocupam 32 bits.

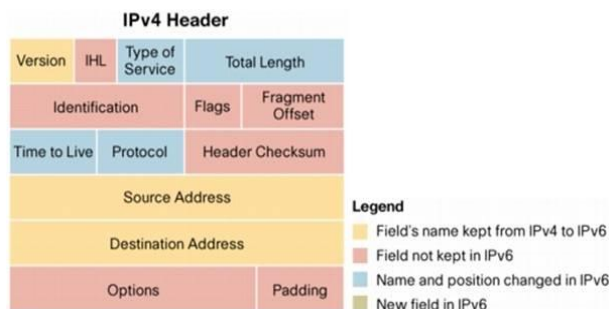


Figura 4 – Cabeçalho do IPv4. [32]

Nos últimos anos verificou-se que os endereços do IPv4 estão a esgotar-se. Para resolver este problema foi desenvolvido o IPv6, que está a ser implementado de forma progressiva. Para além do aumento do número de endereços, esta nova versão tem apenas 8 campos no seu cabeçalho de dimensão fixa (320 bits) (Figura 5). Já a secção de dados contém uma dimensão de 64 kbits. Os campos do cabeçalho do IPv6 são os seguintes: [33]

- Ⓢ *Version*: Indica a versão do IP. Ocupa 6 bits.
- Ⓢ *Traffic Class*: É igual ao *Type of Service* do IPv4. Ocupa 8 bits.
- Ⓢ *Flow Label*: Usado para serviços especiais de aplicações em tempo real. Ocupa 20 bits.
- Ⓢ *Payload Length*: Dimensão dos dados e usa como unidade o número de octetos, ou bytes. Ocupa 16 bits;
- Ⓢ *Next Header*: Indica qual o protocolo usado na secção dos dados do pacote IP.
- Ⓢ *Hop Limit*: Campo que substitui o campo *Time to Live* do IPv4. Ocupa 8 bits.

- ④ *Source Address*: Indica o endereço de origem. Ocupa 128 bits.
- ④ *Destination Address*: Indica o endereço de destino. Ocupa 128 bits.

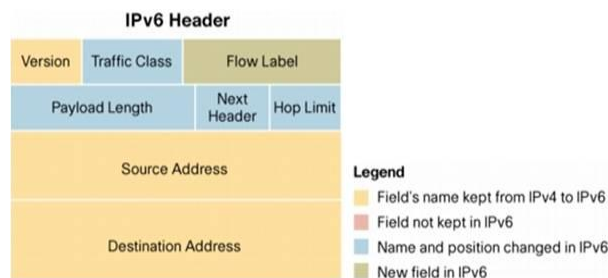


Figura 5 – Cabeçalho do IPv6. [32]

2.1.3 Routers IP

Os elementos principais de uma rede IP são os routers. Estes têm quatro funcionalidades importantes: encapsulamento e conversão, processamento e classificação de pacotes, encaminhamento de pacotes e, por fim, mecanismos de encaminhamento. [29]

O encapsulamento e conversão permitem a interligação de redes que utilizem tecnologias de camada 2 diferentes, por exemplo: ATM, *frame relay* e Ethernet. As funções de processamento e classificação de pacotes têm por sua vez o intuito de analisar o cabeçalho de todos os pacotes que passam pelo router, classificando estes de acordo com a informação aí existente, nomeadamente o endereço de origem ou destino e o campo *type of service*. As funções de encaminhamento de pacotes servem para indicar qual o próximo nó para a qual o pacote recebido deve ser enviado, utilizando como base de informação a tabela de encaminhamento. Por sua vez estas são actualizadas e sincronizadas entre routers de forma periódica e utilizando mecanismos de encaminhamento. [29]

2.1.4 Engenharia de tráfego

Um dos pontos mais críticos das redes IP é a engenharia de tráfego, ou seja, a forma como é efectuado o controlo e o fluxo de pacotes na rede, tentando-se assim planear de forma eficiente a utilização dos recursos existentes na rede. Dois dos pontos mais importantes da engenharia de tráfego são a qualidade de serviço e o encaminhamento.

2.1.4.1 Qualidade de serviço

O IP é o protocolo mais utilizado globalmente, mas não garante qualidade de serviço. No entanto as redes IP suportam os mais variados tipos de serviço, tais como os serviços de voz, vídeo e interactivos, os quais têm diferentes requisitos de qualidade, como por exemplo, a latência, o número de bits errados, a perda de pacotes, o débito binário, etc. Para que sejam cumpridos os acordos de nível de serviço, é necessário que todos os elementos de rede

convencionem entre si quais as técnicas e políticas de qualidade de serviço a utilizar. Uma das técnicas mais comuns para proporcionar qualidade de serviço é a utilização de listas de espera. As principais técnicas de fila de espera são: [29]

- Ⓢ Primeiro a entrar, primeiro a sair (FIFO – *First-In, First-Out*): Esta é a técnica mais comum e tal como o nome indica, os primeiros pacotes a chegarem ao router são os primeiros a serem encaminhados. Nesta técnica, não há noção de prioridades nem de qualidade de serviço.

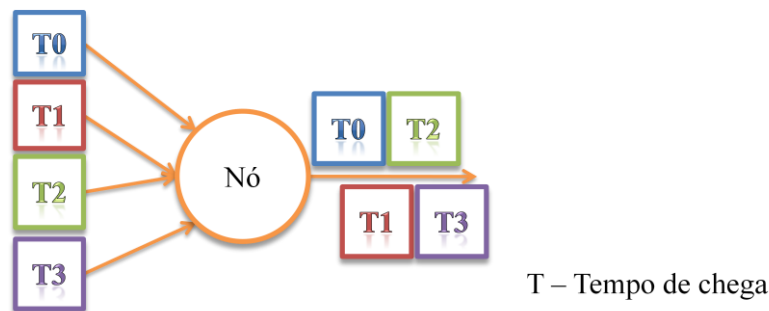


Figura 6 – Exemplo da técnica FIFO.

- Ⓢ Prioritárias (*priority queuing*): Nesta técnica a cada pacote é atribuída uma prioridade, por exemplo, alta, media, normal e baixa. Podem ser usadas diferentes características para definir estas prioridades, por exemplo, a dimensão do pacote, a interface de chegada, ou os endereços de origem/destino [34]. Esta é uma técnica injusta, tendo em conta que serve primeiro os pacotes com maior prioridade, podendo assim criar estrangulamentos para os restantes. No entanto, tem a vantagem de dar maior garantia aos serviços de maior prioridade.

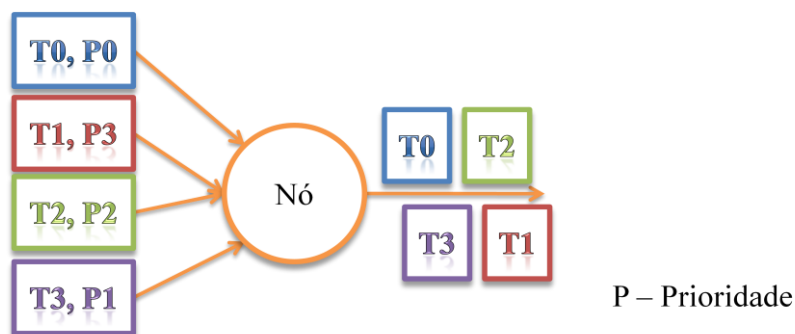


Figura 7 – Exemplo da técnica *priority queuing*.

- Ⓢ Personalizáveis (*custom queuing*): Esta técnica é utilizada em ligações de alto débito, na qual existem, por omissão, 16 filas de espera. A primeira fila é a lista do sistema, a qual é sempre atendida assim que tem tráfego. As restantes filas estão divididas por tipo de tráfego e são divididas por percentagem de tráfego,

sendo o somatório das percentagens igual a 100% [35]. Recorrendo à Figura 8, o tráfego que vai chegando é catalogado ou classificado (SQL, WWW, FTP, etc.) e atribuído a uma das 16 filas. Depois a cada uma destas filas é atribuído um valor sobre a largura de banda do tráfego de saída e todas as filas são atendidas através de um sistema de *round-robin*, eliminando assim estrangulamentos e tornando esta técnica justa. Assim sendo o tráfego de saída neste caso é composto por 50% de SQL, 30% de FTP e 20% de WWW.



Figura 8 – Exemplo da técnica *custom queuing*.

- Ⓢ Distribuição justa (*weighted fair queuing*): Esta técnica é um misto entre a lista de espera prioritária e a personalizável e funciona em função do campo *type of service* do cabeçalho IP, tendo o tráfego interactivo maior prioridade, sendo-lhe atribuída maior largura de banda de saída [35]. A restante largura de banda é dividida pelas várias filas que possam existir. Observando a Figura 9, o tráfego que faz parte da fila de espera 1 tem maior prioridade, P0, e como tal tem pelo menos 60% da largura de banda de saída, enquanto as restantes filas com menor prioridade têm 30% e 10%, respectivamente. Esta é uma técnica justa que não tem limite de filas de espera, sendo normalmente utilizada em ligações de baixo débito.

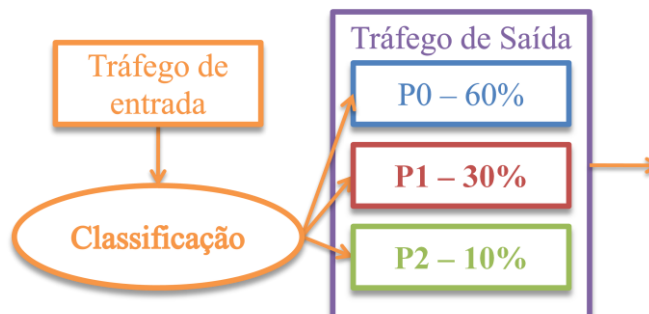


Figura 9 – Exemplo de uma lista de espera WFQ.

2.1.4.2 Encaminhamento

Tal como indicado anteriormente, o encaminhamento de pacotes é uma das funcionalidades mais importantes da engenharia de tráfego, pois é necessário determinar qual o caminho que um pacote deve seguir para chegar ao destino. Esta tarefa é realizada pelos protocolos de encaminhamento, através de algoritmos de encaminhamento. O objectivo destes algoritmos é simples: dado um conjunto de routers com ligações entres estes, qual é o melhor caminho a utilizar entre a origem e o destino, sendo que o melhor caminho está normalmente associado ao caminho com o custo mais baixo. Os dois protocolos mais comuns são, o *distance vector* e o *link-state*. [36]

O protocolo *distance vector* tem as seguintes características: [36]

- ⊗ Distribuído: cada nó comunica apenas com os nós que está ligado, sendo que inicialmente só conhecem o custo das ligações à qual se encontra ligado.

Exemplo: Na Figura 10, o nó 1 inicialmente apenas sabe o custo para o nó 2 e 3.

- ⊗ Iterativo: os nós da rede trocam informação sobre os custos de cada ligação, até que todos os nós tenham conhecimento do custo total de cada caminho.

Exemplo: Na Figura 10, o nó 2 informa o nó 1 que o custo para chegar ao nó 4 através de si é de 2. De forma semelhante, o nó 3 informa o nó 1 de qual o custo para chegar ao nó 4.

- ⊗ Assíncrono: não espera pela resposta de todos os nós para calcular/actualizar o custo de um caminho.

Exemplo: Na Figura 10 o nó 1 pergunta aos nó 2 e 3 qual o custo para chegar ao nó 4. O nó 2 responde 2 e imediatamente o nó 1 coloca na sua tabela que o custo para 4 é 7 (5+2). O nó 1 não esperou pela resposta de 3 para fazer a actualização do custo. Visto que o processo é iterativo, quando o nó 1 receber a resposta do nó 3 detecta que o custo é apenas 4 e aí volta a actualizar a sua tabela com o novo custo.

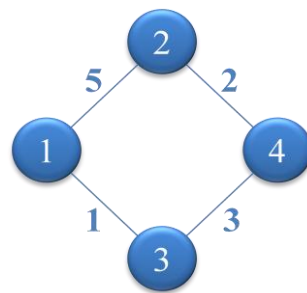


Figura 10 – Rede de 4 nós.

Um dos algoritmos *distance vector* mais utilizado é o Bellman-Ford, sendo que este é aplicado em protocolos como o Internet BGP (*Border Gateway Protocol*), ISO IDRIP (*Inter-Domain Routing Protocol*), Novell IPX (*Internetwork Packet Exchange*) e na ARPAnet original. [36]

Tal como indicado anteriormente, para além dos protocolos do tipo *distance vector*, existe os protocolos do tipo *link-state*. O algoritmo que é normalmente utilizado no protocolo *link-state* é o algoritmo de Dijkstra. Este algoritmo calcula o caminho mais curto entre todos os pares (origem, destino) da rede e é um algoritmo iterativo, sendo que à *n*-ésima iteração são conhecidos os *n* caminhos mais curtos. Esta característica faz com que este algoritmo tenha um tempo de computação (ou grau de complexidade) baixo [36]. O conceito geral deste algoritmo pode ser explicado com base no seguinte exemplo:

- Ⓒ A Figura 11 é uma rede composta por 6 nós (A, B, C, D, E, F) e por 9 ligações, e vai ser utilizada para demonstrar como é construída a tabela de encaminhamento do nó A. A Tabela 2 indica qual é a distância entre o nó A e os restantes nós, sendo que inicialmente não são conhecidas as ligações, sendo o seu valor infinito.

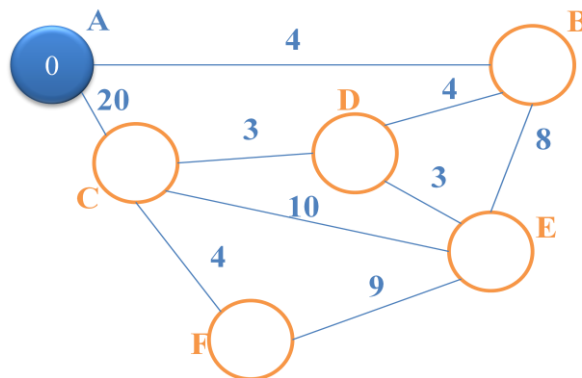


Figura 11 – Mapa de seis nós para o exemplo do algoritmo de Dijkstra.

Tabela 2 – Tabela de encaminhamento inicial para o exemplo do algoritmo de Dijkstra.

Vértice	B	C	D	E	F
Distância desde A	∞	∞	∞	∞	∞

- Ⓒ O primeiro passo é determinar qual o vizinho mais próximo, sendo que existem duas ligações (Figura 12), em que uma liga a C e com um peso de 20 e outra liga a B com um peso de 4.

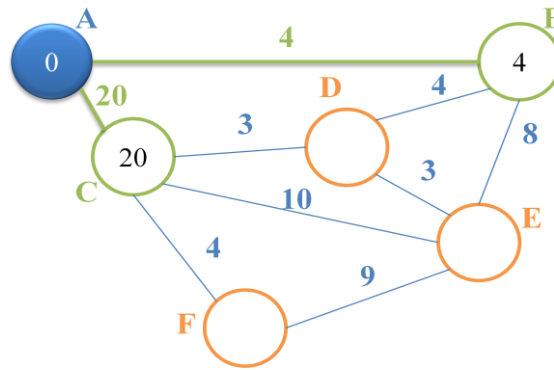


Figura 12 – Primeiro passo do algoritmo de Dijkstra.

- ⊗ Tendo em conta o peso das ligações, o primeiro nó a ser registado (Tabela 3) é o B, com uma distância de 4, visto ser a ligação que contém a distância mais pequena. Nesta altura, o nó A toma conhecimento neste caso das duas ligações adjacentes a B (Figura 13), uma com o peso de 4 e que liga a D e a outra com um peso de 8 e que liga a E.

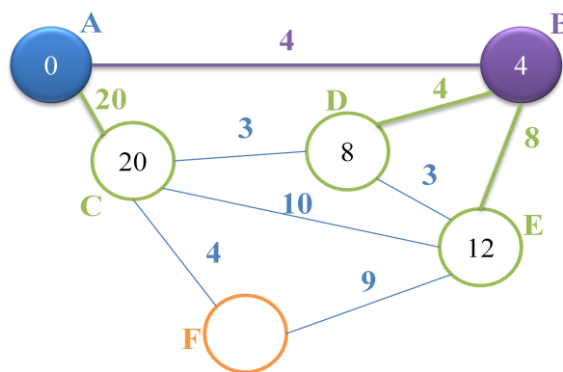


Figura 13 – Segundo passo do algoritmo de Dijkstra.

Tabela 3 – Primeira actualização da tabela de encaminhamento para o exemplo do algoritmo de Dijkstra.

Vértice	B	C	D	E	F
Distância desde A	4	∞	∞	∞	∞

- ⊗ De seguida, existem 3 ligações que podem ser adicionados à tabela de A. Estas ligam a D com uma distância de 8, a E com uma distância de 12 e a C com uma distância de 20. Das 3 ligações, a que é adicionada (Tabela 4) é a que liga ao nó D, visto ter a distância total mais curta. A rede fica agora com a disposição que se encontra na Figura 14.

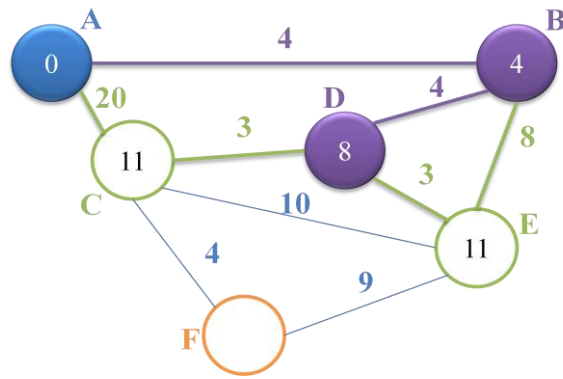


Figura 14 – Terceiro passo do algoritmo de Dijkstra.

Tabela 4 – Segunda actualização da tabela de encaminhamento para o exemplo do algoritmo de Dijkstra.

Vértice	B	C	D	E	F
Distância desde A	4	∞	8	∞	∞

- ⊙ O nó A passa a conhecer mais duas ligações (Figura 14), tendo ambas um peso de 3, o que perfaz uma distância total de 8 para ambas. Em caso de igualdade na distância total, a escolha depende de como está implementado o algoritmo, sendo que o mais comum é escolher o caminho com o menor número de nós e de seguida é utilizada a ordem crescente do nome do nó. Neste caso, entre C e E é escolhida a ligação que liga a C, tal como indica a Figura 15. Assim sendo, na tabela fica registada esta ligação com uma distância de 11 e são descobertas duas novas ligações, uma com peso de 4 que liga C a F e uma com peso de 10 que liga C a E (Figura 15). Visto que o caminho mais curto para chegar a C, passa por B e D, a ligação entre A e C não é utilizada.

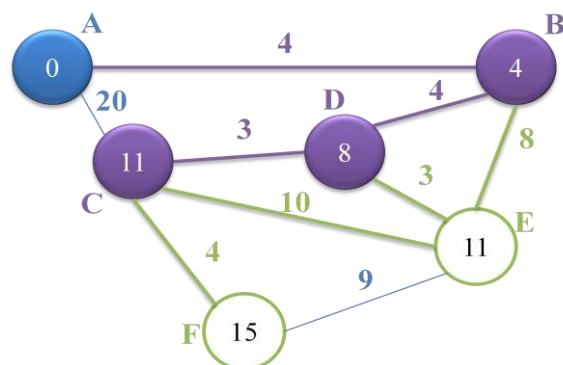


Figura 15 – Quarto passo do algoritmo de Dijkstra.

Tabela 5 – Terceira actualização da tabela de encaminhamento para o exemplo do algoritmo de Dijkstra.

Vértice	B	C	D	E	F
Distância desde A	4	11	8	∞	∞

- Ⓜ Tendo em conta as ligações que A conhece nesta altura (Figura 15) a próxima ligação a ser registada é a ligação entre D e E, com uma distância de 11 (Tabela 6), tal como se pode visualizar na Figura 16. Com o vértice E já no mapa de A, é descoberta a ligação entre E e F, com um peso de 9.

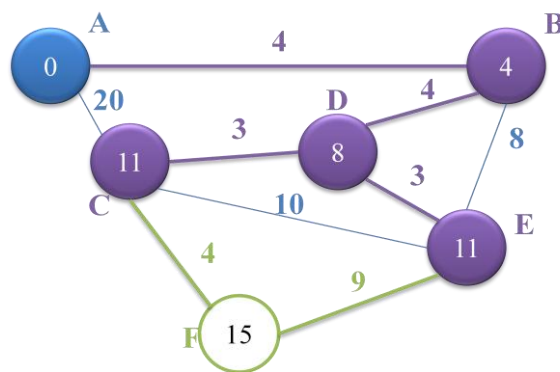


Figura 16 – Quinto passo do algoritmo de Dijkstra.

Tabela 6 – Quarta actualização da tabela de encaminhamento para o exemplo do algoritmo de Dijkstra.

Vértice	B	C	D	E	F
Distância desde A	4	11	8	11	∞

- Ⓜ O último passo que é necessário efectuar é inserir a ligação até F. Visto que das duas ligações existentes a que tem o peso mais baixo é a que liga C a F (peso 4), esta é a escolhida, sendo a distância total entre A e F de 15, tal como se pode visualizar na Figura 17. Assim sendo as distâncias total entre A e os restantes nós podem ser visualizadas na Tabela 7.

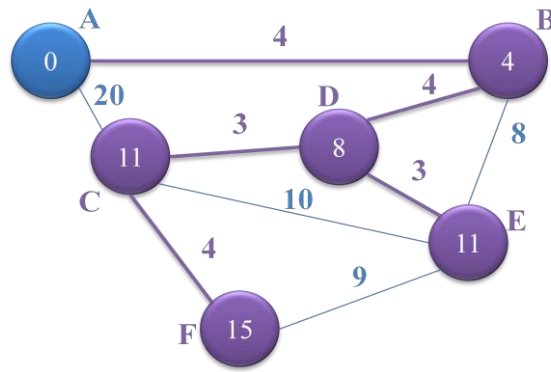


Figura 17 – Sexto passo do algoritmo de Dijkstra.

Tabela 7 – Quinta actualização da tabela de encaminhamento para o exemplo do algoritmo de Dijkstra.

Vértice	B	C	D	E	F
Distância desde A	4	11	8	11	15

Este é um algoritmo que pode levar ao aumento dos atrasos nas ligações entre nós se não forem atribuídos com cuidado os pesos das ligações. Esta atribuição está normalmente associada à distância física entre dois nós, sendo que a qualquer altura estes valores podem ser alterados para se efectuar balanceamento de carga na rede, de forma que esta se torne mais eficiente.

2.1.5 Encaminhamento na Internet

A Internet é uma vasta rede global que interliga milhares de redes. A Figura 18 demonstra este conceito de uma forma simplista. Existem quatro redes designadas de sistemas autónomos (AS - *Autonomous System*), na qual cada um desses sistemas utiliza uma única política de encaminhamento para efectuar as suas ligações entre os seus routers (ligações intra-domínio) e para efectuar as ligações entre diferentes sistemas autónomos (ligações inter-domínio) utiliza routers de fronteira, que podem ter diferentes políticas de encaminhamento. Neste caso os routers de fronteira são R3, R4, R6, R7, R8, R10 e R11.

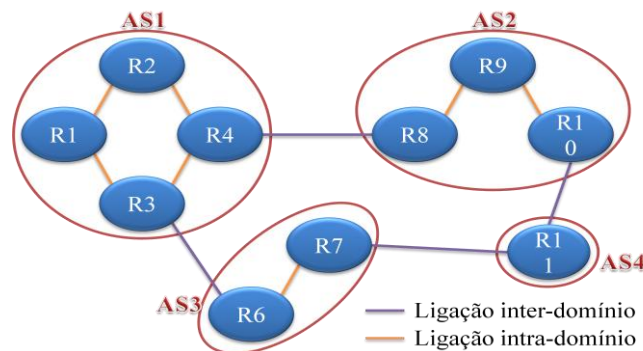


Figura 18 – Composição simplista da Internet.

2.1.4.1 Encaminhamento Intra-domínio

Na comunicação intra-domínio, os *Interior Gateway Protocols* (IGP) mais predominantes de hoje são [37]: o OSPF [38] e o IS-IS [39], sendo que todos estes são protocolos de encaminhamento do tipo *link-state*. Os IGP têm a capacidade de conseguirem detectar rapidamente mudanças topológicas e de conseguirem ajustar o fluxo de tráfego. Cada router gera a sua própria visão da rede, a qual é composta pelos custos para os seus vizinhos. Este ponto de vista da topologia é distribuído por toda a rede, tendo todos os routers uma cópia exacta desta versão, obtida através de mecanismos de inundação. Quando a distribuição está concluída, cada router tem uma cópia do mapa global da rede. Conhecida a topologia da rede, é aplicado um algoritmo de SPF (*Shortest Path First*), como o algoritmo de Dijkstra, em que é calculada uma árvore de caminhos mais curtos para cada destino. O custo associado a cada ligação da rede é conhecido como peso OSPF/IS-IS e é configurado pelo operador de rede. Diminuindo o peso de uma ligação na rede é possível atrair mais tráfego para esta ligação. Dependendo dos pesos de cada ligação, o algoritmo SPF pode calcular vários caminhos com custos iguais para o mesmo destino. Neste caso é efectuado balanceamento de carga, ou seja, o tráfego é dividido entre os diferentes caminhos IP disponíveis.

2.1.4.2 Encaminhamento Inter-domínio

Os protocolos de encaminhamento intra-domínio (apresentados anteriormente) indicam a forma como o tráfego flui ao longo de um único AS. No entanto o fluxo de tráfego da Internet circula entre diferentes sistemas autónomos e para indicar como é que o tráfego flui entre estes, são utilizados protocolos de encaminhamento inter-domínio.

O protocolo inter-domínio dominante é o BGP [40]. Este é um protocolo *path-vector*. Basicamente o BGP é semelhante a um protocolo de *distance vector*, mas em vez de ser indicada a distância para um determinado destino, é indicado um caminho de AS até ao destino, ou seja, uma sequência de números de AS que correspondem aos sistemas autónomos que são necessários percorrer até que o destino seja alcançado.

Para efectuar o encaminhamento inter-domínio são estabelecidas conexões TCP (ou sessões) entre routers. Quando a comunicação é entre routers de diferentes AS, é utilizado o E-BGP (*Exterior BGP*). Quando a comunicação é entre routers BGP da mesma AS, é utilizado o I-BGP (*Interior BGP*).

Assim que dois routers BGP estabelecem uma conexão, eles trocam informações sobre as redes que podem ser acedidas através deles e os caminhos AS a usar. Esta informação é então utilizada para construir um grafo de conectividade, a partir das quais são definidas quais as

políticas de decisão a executar para que sejam evitados *loops*. Cada ponto BGP calcula o menor caminho para cada AS de destino e anuncia-o aos seus vizinhos.

2.2 Camada física

Esta dissertação é baseada no IP sobre WDM, sendo necessário perceber um pouco os conceitos por detrás de alguns dos equipamentos utilizados nestas redes, desde emissores, a fibras ópticas, a multiplexadores e *transponders* e arquitecturas IP sobre WDM.

2.2.1 Topologias de redes

As redes de telecomunicações são compostas por ligações, nós e terminais. Estas estão normalmente divididas em três partes, Figura 19, a rede nuclear (*core network* ou *backbone*), a rede metropolitana (*metropolitan network*) e a rede de acesso (*access network*).

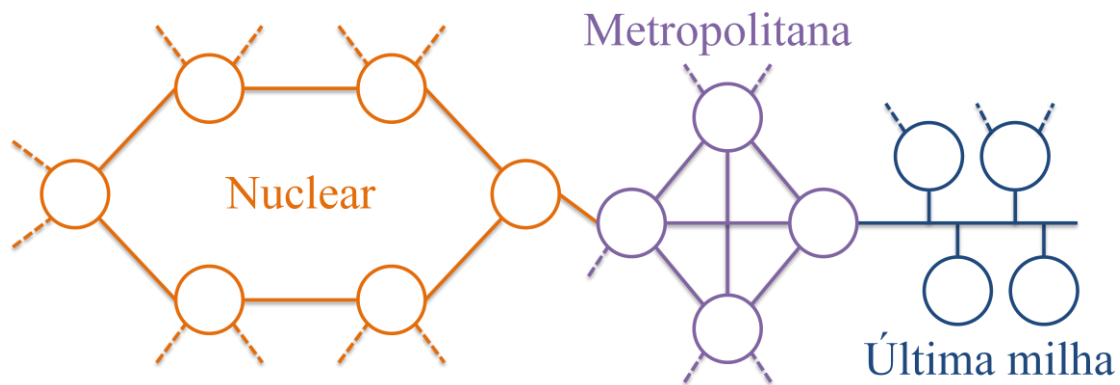


Figura 19 – Três principais tipos de rede.

A rede nuclear tem como objectivo principal fornecer ligações elevado débito sobre longas distâncias, interligando diferentes redes de menor dimensão, por exemplo, para ligar redes de diferentes cidades, estados, países ou até mesmo continentes. As redes metropolitanas são bastante semelhantes às redes nucleares, no entanto são utilizadas a uma escala mais pequena, por exemplo, do tamanho de uma cidade ou parte de uma cidade. As redes de acesso são normalmente a parte da rede que liga os operadores de serviços (*Internet Service Providers*) aos clientes, sendo normalmente designada como rede de última milha.

2.2.2 Comutação

A comutação nas redes de telecomunicações pode ser de um de três tipos: comutação por circuitos, por pacotes ou por células.

As redes com comutação por circuitos são aquelas em que é necessária a reserva de recursos antes de se estabelecer uma ligação, sendo necessária a troca de informação antes e

depois da ligação, criando atrasos extras na ligação. Exemplo deste tipo de comutação a rede telefónica, onde é necessário reservar uma ligação até ao destino antes de se estabelecer a chamada, garantido assim qualidade de serviço. No entanto estas ligações têm de ser mantidas desde o início da chamada até ao fim e como tal não é possível reorganizar as ligações activas, resultando na perda de eficiência dos recursos da rede.

As redes com comutação por pacotes são redes onde não existe reservas de recursos. Neste tipo de comutação a troca de dados é feita através de pacotes discretos, que diferem consoante os protocolos usados pela rede. A informação sobre o que está em cada um destes pacotes encontra-se no seu cabeçalho. Este tipo de comutação é utilizado em redes IP, sendo os dados colocados em um ou mais pacotes, que podem ser enviados por diferentes caminhos, sem que exista a reserva de uma ligação exclusiva. As redes de comutação por pacotes estão divididas em duas categorias: redes orientadas à conexão e redes não orientadas à conexão. As primeiras são redes que para além de garantirem a integridade do tráfego, também suportam diferentes tipos de tráfego e protocolos na mesma ligação, oferecendo uma razoável flexibilidade. As segundas são redes que para além de não garantirem a integridade do tráfego, também não suportam na mesma ligação diferentes tipos de tráfego e protocolos, no entanto são mais flexíveis que as primeiras. [29]

O último tipo de comutação é a comutação por células. Neste tipo de comutação existe um estabelecimento prévio da ligação, como na comutação por circuitos, mas não requer a reserva de circuitos e/ou pacotes (que neste caso se chamam de células), como na comutação de pacotes. As células são de dimensão fixa e usam endereços locais. [29]

Na Tabela 8 está um resumo das características dos diferentes tipos de comutação.

Tabela 8 – Comutação por circuito, pacote e célula. [29]

	Comutação por circuitos	Comutação por pacotes		Comutação por células
		Não orientado à conexão	Orientado à conexão	
Utilização de recursos da rede	Não é eficiente	Bastante eficiente	Eficiente	Eficiente
Integridade da sequência do tráfego	Garante	Não garante	Garante	Possível
Garantia de tempo-real	Existe	Não existe	Não existe	Possível
Flexibilidade	Fraca	Bastante boa	Boa	Boa
Diferentes tipos de tráfego/protocolos	Suporta	Não suporta	Suporta	Suporta
Exemplos de tecnologias	PSTN	IP, SS7	X.25, <i>Frame Relay</i>	ATM

2.2.3 Redes Ópticas

As redes de telecomunicações utilizam, pelo menos, um meio físico de transmissão, sendo que a sua escolha depende das características da localização. Por exemplo, se entre duas cidades existir uma zona bastante montanhosa, é natural recorrer-se a ligações por satélite, sendo o meio de transmissão o espaço livre, já se for uma rede metropolitana, é mais provável utilizarem-se pares entrelaçados de cobre, cabos coaxiais ou fibra óptica, sendo que de entre estes 3 tipos de suporte de transmissão, a fibra óptica é o meio com maior capacidade. A capacidade da fibra óptica advém principalmente da baixa atenuação, dos elevados débitos suportados e da imunidade a interferências electromagnéticas.

2.2.3.1 Fibra Óptica

Toda a tecnologia por detrás da fibra óptica é bastante complexa, mas o princípio base de funcionamento é simples: enviar os dados através de feixes de luz num núcleo cilíndrico, até chegar ao receptor. A Figura 20 apresenta o conceito da propagação da luz dentro da fibra, a qual é constituída por um núcleo, uma bainha e uma cobertura. O feixe de luz transmitido é reflectido ao longo da fibra óptica até chegar ao destino. Para este ser totalmente reflectido, o índice de refração do núcleo tem de ser ligeiramente superior ao da bainha. O núcleo e a bainha são de sílica, enquanto a cobertura utiliza o mais variado tipo de materiais e camadas para impedir que a luz não se disperse para o exterior da fibra e para lhe oferecer alguma protecção.

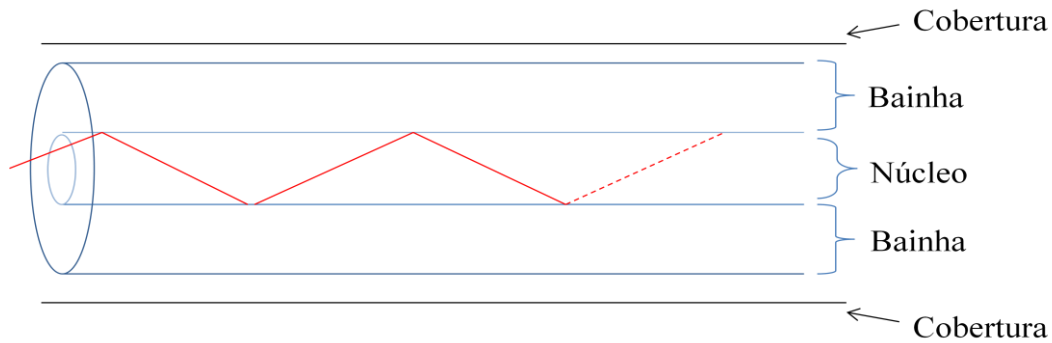


Figura 20 – Conceito básico da transmissão sobre fibra óptica.

A fibra óptica é um meio de transmissão notável quando comparado com o par de cobre, o cabo coaxial ou o espaço livre. Esta é composta maioritariamente por sílica e consegue proporcionar baixa atenuação e transmissões dentro de uma gama de frequências de pelo menos 25 THz, sendo esta gama muito superior ao oferecido por qualquer outro meio de transmissão. Esta gama de frequências é tão elevada que suporta, por exemplo, a transmissão de centenas de milhões de chamadas telefónicas ou cerca de um milhão de fluxos de vídeo de televisão de alta definição (HDTV). A sua baixa atenuação proporciona transmissões a grandes distâncias antes que o sinal enviado necessite de ser amplificado ou regenerado. Já a elevada frequência a que trabalha proporciona elevadas larguras de banda, resultando em elevados débitos. É devido a estas características que a fibra óptica é um dos meios de transmissão mais utilizados [29]. No entanto, a fibra também tem limitações, tais como a atenuação, que embora seja baixa tem de ser contabilizada, a dispersão e os efeitos não lineares.

Atenuação

A atenuação é uma das principais limitações da fibra óptica, cujas principais causas são a absorção do material, a dispersão de *Rayleigh* e as curvaturas na fibra óptica. Na Figura 21 é possível visualizar a atenuação na fibra óptica em função do comprimento de onda utilizado, na qual se verifica a existência de dois picos onde a atenuação é elevada (0.95 μm e 1.38 μm). Estes picos devem-se às impurezas existentes na sílica, mais propriamente as moléculas de vapor de água (OH⁻) que absorvem parte da potência óptica transmitida. A restante curva da atenuação deve-se maioritariamente à dispersão de *Rayleigh*. [41]

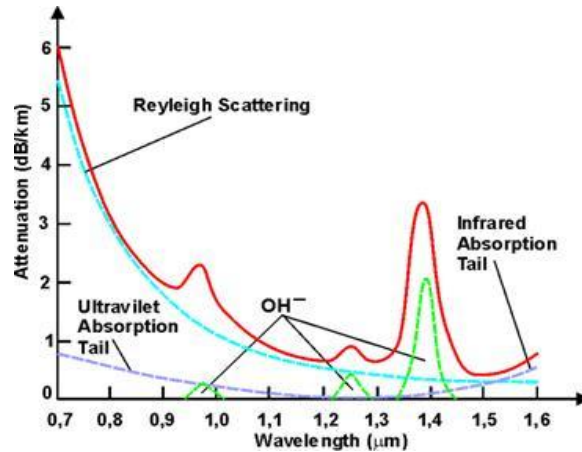


Figura 21 – Atenuação e suas componentes na fibra óptica. [42]

Devido às bandas operacionais dos amplificadores existentes e à curva da atenuação, existem três janelas operacionais, ou seja, três bandas onde os sistemas ópticos operam. Estas janelas estão centradas nos: 0,8 μm, 1,3 μm e 1,55 μm. A terceira janela é dividida em três bandas distintas, tal como indica a Figura 22, devido exclusivamente às limitações impostas pelos amplificadores existentes. A banda C começa nos 1530 nm e chega aos 1565 nm, utilizando amplificadores de fibra dopada com érbio. A banda L que vai desde os 1565 nm até ao 1625 nm, utiliza o mesmo tipo de amplificadores mas com ganho deslocado. A banda S que vai desde os 1460 nm até aos 1530 nm, utiliza amplificadores de *Raman*.

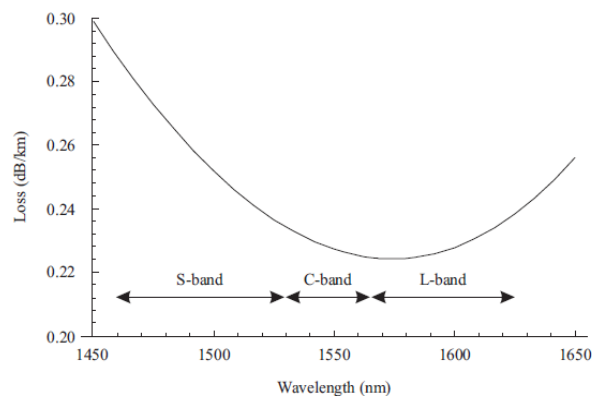


Figura 22 – Terceira janela de funcionamento operacional da fibra óptica. [43]

Por último, as perdas por curvatura. Estas existem principalmente devido às curvaturas da fibra aquando da sua instalação, mas no entanto também podem ser causadas por microcurvaturas. Estas podem existir devido ao processo de fabricação, ou à aplicação de pressão lateral e não uniforme durante a instalação da mesma. Estas perdas são maiores nos 1,55 μm do que nos 1,3 μm e aumentam com a diminuição do raio de curvatura.

Dispersão

Para além da atenuação, explicada anteriormente, existem mais limitações na transmissão de informação em fibra óptica. Uma dessas limitações é a dispersão. Esta existe, porque as diferentes componentes de um sinal podem propagam-se a velocidades diferentes na fibra, chegando ao receptor em instantes temporais diferentes. A Figura 23 apresenta a consequência da dispersão, a interferência intersimbólica. À medida que um impulso injectado numa fibra óptica se propaga, este vai alargando com o tempo de tal forma que se pode sobrepor a um impulso adjacente.

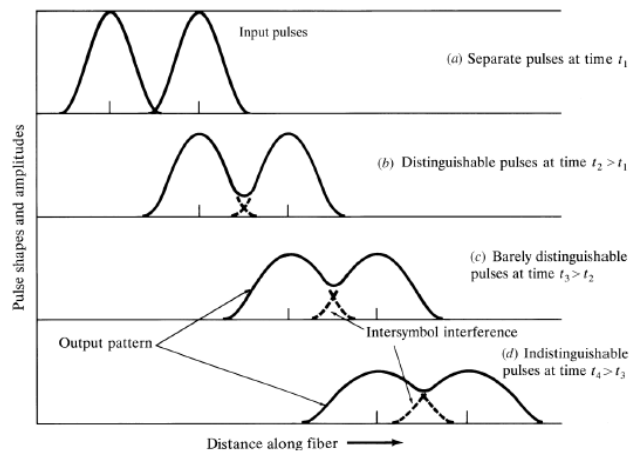


Figura 23 – Interferência intersimbólica. [30]

Existem diferentes formas de dispersão: intermodal, de polarização e cromática. A dispersão intermodal só existe em fibras multimodo e é provocada pelos diversos modos de propagação se propagarem com velocidades diferentes ao longo de uma fibra multimodo. Já a fibra monomodo, como tem um núcleo bem mais pequeno, força a energia do sinal a viajar num único modo, e como tal dispersão intermodal nunca acontece [43].

A dispersão de polarização surge quando o núcleo da fibra não é perfeitamente circular. O resultado, tal como demonstrado na Figura 24, é a propagação a velocidades diferentes dos dois modos de polarização luz.

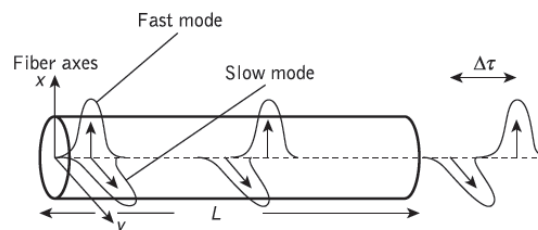


Figura 24 – Efeito da dispersão de polarização. [44]

Por último, a dispersão cromática. Um impulso nunca é composto por um único comprimento de onda, mas sim por uma largura de banda espectral. A dispersão cromática surge, pois as diferentes componentes espectrais desta banda propagam-se a diferentes velocidades, chegando ao receptor em instantes de tempo diferentes. Este efeito é o mais nocivo de todos e está dividido em dois: [44]

- ⊙ Dispersão do material que compõe a fibra, sendo que o índice de refração da sílica depende do comprimento de onda; [44]
- ⊙ Dispersão do guia de onda, que surge porque nem toda a energia transmitida se propaga ao longo do núcleo da fibra óptica, sendo que parte da potência do sinal acaba por propagar-se na bainha da fibra. A dispersão do guia de onda também depende do comprimento de onda, quanto maior esse comprimento de onda, maior é potência que segue pela bainha. [44]

Efeitos não lineares

Com a evolução dos sistemas de comunicação ópticos, tanto a potência como o débito binário foram aumentando e os efeitos não lineares daí resultantes tornaram-se problemáticos. Estes são bastante nocivos para sistemas que utilizem alguns miliwatt de potência, e em débitos binários superiores a 10 Gbps, em especial para sistemas WDM.

Estes efeitos estão divididos em duas categorias, uma relacionada com as moléculas da sílica e a outra com o índice de refração da fibra óptica. A primeira é devido à vibração das moléculas da sílica ao interagirem com as ondas de luz, sendo que nesta categoria os dois principais efeitos são a dispersão estimulada de *Brillouin* (SBS) e a dispersão estimulada de *Raman* (SRS). Considera-se que existe dispersão estimulada de *Brillouin* quando da onda original surge uma segunda onda com uma energia inferior (ou seja, comprimento de onda superior), que devido à vibração das moléculas da sílica, a reflecte de volta para o emissor. A esta segunda onda dá-se o nome de onda de *Stokes*, Figura 25. [43]

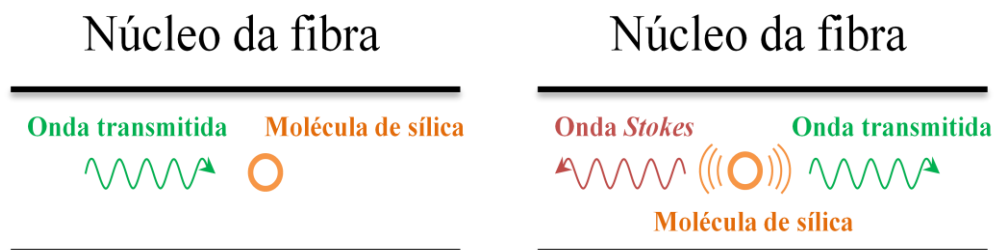


Figura 25 – Criação da onda de Stokes.

Ao contrário da onda que se quer transmitir, a onda de *Stokes* está sempre a ganhar potência, pois acumula toda a potência reflectida ao longo da fibra óptica, Figura 26. Para se contrariar este efeito é necessário utilizar isoladores que eliminem a onda de *Stokes*.

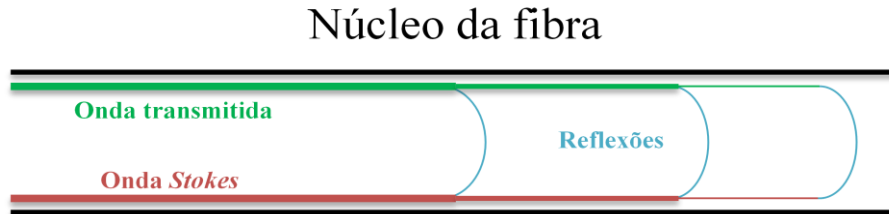


Figura 26 – Acumulação das várias ondas de *Stokes*.

Considera-se difusão estimulada de *Raman* quando, vários sinais com comprimentos de onda diferentes são injectados numa fibra óptica e a potência dos comprimentos de onda mais baixos é transferida para os comprimentos de onda mais altos, Figura 27. No entanto o ganho da transferência de potência é inferior ao existente na difusão estimulada de *Brillouin*. Este tipo de efeito é aproveitado para construir amplificadores. [43]



Figura 27 – Dispersão estimulada de *Raman*. Baseado em [43]

A segunda categoria de efeitos não lineares surge devido à dependência do índice de refração com a potência óptica, sendo que os efeitos mais importantes desta categoria são a auto-modulação de fase (SPM), a modulação de fase cruzada (CPM) e a mistura de quatro ondas (FWM). [30]

A auto-modulação de fase surge do facto do índice de refração da fibra não ser constante, induzindo variações de fase no sinal, sendo esta variação proporcional à intensidade do próprio sinal. Assim sendo a frequência do sinal começa a variar com o tempo, levando ao alargamento dos seus impulsos, Figura 28. A consequência do efeito da auto-modulação de fase é o aumento do efeito da dispersão cromática, o que é bastante nocivo para o sinal a transmitir. Por outro lado, nos sistemas WDM existe a possibilidade de um sinal ser afectado pelas variações de fase de outro sinal (modulação de fase cruzada).

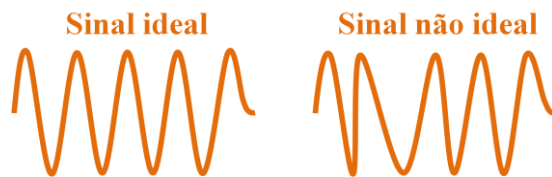


Figura 28 – Efeito não linear de auto-modulação de fase. Baseado em [43]

Por fim, temos o efeito de mistura de quatro ondas, que afecta exclusivamente os sistemas WDM. Este efeito surge quando um sinal WDM composto por vários comprimentos de onda dá origem a réplicas de si próprio, criando assim o efeito de diafonia, Figura 29. Este efeito é grave quando o espectro do sinal WDM é largo o suficiente para que o sinal se sobreponha a si próprio.

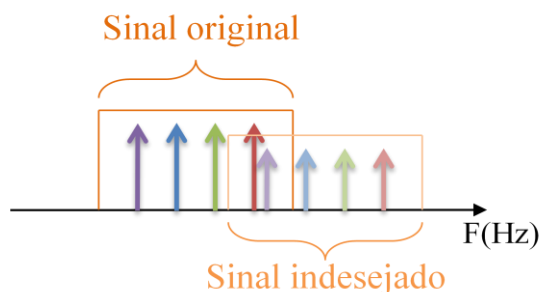


Figura 29 – Sobreposição do espectro.

2.2.3.2 Emissores e receptores

Anteriormente foram explicadas algumas das características da fibra óptica, sendo agora necessário compreender também um pouco sobre os emissores e receptores usados nestes sistemas.

Existem dois tipos primários de emissores ópticos, o díodo LED (*Light-Emitting Diode*) e o díodo LASER (*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*). Ambos são construídos com base em tecnologia de semi-condutores geradores de luz. [29]

Os LED são emissores consideravelmente mais baratos, que têm um período de vida mais longo e podem operar numa gama de temperaturas mais elevada. No entanto estes só podem ser utilizados em sistemas com baixos débitos e de curta distância, visto que emitem com baixas potências e apresentam elevadas larguras espectrais de saída. Os díodos LED são junções PN polarizadas directamente, na qual a recombinação de electrões na camada do tipo *p* e lacunas na camada do tipo *n* leva à existência de emissões espontâneas produzindo assim luz espontânea. [29, 30]

Os laser são emissores capazes de fornecer um débito maior, visto que apresentam largas espectrais mais finas e o sinal que produzem sofre menos com a dispersão gerada ao longo da fibra óptica. Estes são essencialmente um amplificador óptico fechado no interior de uma cavidade que causa uma oscilação através de realimentação positiva, sendo apenas amplificados os comprimentos de onda que são ressonantes com a cavidade, tal como demonstra a Figura 30. O tipo de emissor ilustrado na figura é conhecido como emissor *Fabry-Perot*. Existem dois tipos de lasers, os de semicondutor, que utilizam semicondutores para obter ganho de potência e os lasers de fibra, que usam fibra de érbio dopado para obter ganho de potência. Ambos os emissores laser são capazes de produzir potências de saída elevadas, na ordem dos 0 a 20 dBm. [29 e 30]

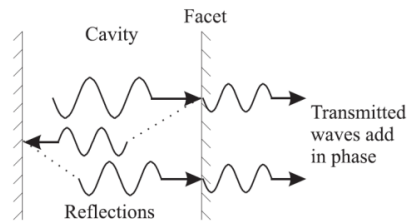


Figura 30 – Reflexão e transmissão utilizando as faces de uma cavidade *Fabry-Perot*. [43]

Tal como os emissores, os receptores ópticos também são constituídos por material semicondutor, mas neste caso em vez de emitirem luz detectam-na, gerando um sinal eléctrico proporcional à potência óptica de chegada. A Figura 31 apresenta a composição típica de um receptor óptico. Após a amplificação (que é opcional) do sinal óptico, o fotodetector converte a potência óptica em corrente eléctrica. De seguida existe um amplificador (*Front-end amplifier*) que amplifica a corrente para um nível que possa ser utilizável por um circuito de decisão, sendo que é este circuito que traduz a corrente eléctrica em dados binários, consoante a modulação que é aplicada ao sinal a transmitir. [30]

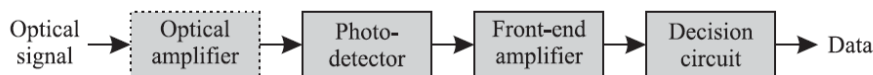


Figura 31 – Diagrama de blocos de um receptor óptico. [43]

O componente mais importante deste processo é o fotodetector, pois é o que faz o processo inverso do emissor. O seu funcionamento está ilustrado na Figura 32. Os fótons de luz, quando incidem no semicondutor, são absorvidos pelos electrões existentes na banda de valência, que ao adquirem uma energia superior são excitados e passam da banda valência para a banda de condução, deixando uma lacuna na banda anterior. Quando é aplicada uma tensão

externa no semiconductor, este par electrão lacuna gera uma corrente, denominada de fotocorrente. [30]

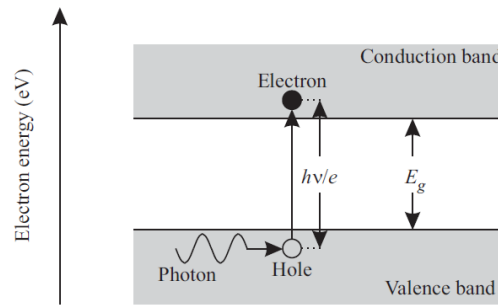


Figura 32 – Princípio básico da fotodeteção utilizando um semiconductor. [43]

2.2.4 Wavelength Division Multiplexing

As fibras ópticas têm vindo a evoluir ao longo do tempo e como tal os débitos suportados por estas são cada vez maiores. No entanto a fibra está limitada pela velocidade à qual a electrónica consegue processar a informação. Por exemplo, um bloco de 70 bits (pacote Ethernet pequeno) que apresente um ritmo binário de 100 Mbps necessita de 5.6 μ s para ser processado, enquanto se for a 10 Gbps, o mesmo bloco tem 56 ns para ser processado. Na primeira geração de redes ópticas, todos os fluxos que passavam por um nó tinham de ser processados electricamente e portanto esta limitação era importante. Uma solução para reduzir este problema é efectuar o encaminhamento sempre a nível óptico, sem recorrer a conversões O-E-O (óptica-eléctrica-óptica). Esta solução levou ao desenvolvimento da segunda geração de redes ópticas, cujos componentes ao longo da rede são maioritariamente ópticos. Esta nova geração de redes é capaz de proporcionar o que se designa por caminhos ópticos (ou caminhos de luz). Estes não são mais do que ligações ópticas ponto-a-ponto que utilizam um comprimento de onda da origem ao destino. Nos nós intermédios da rede, os comprimentos de onda são comutados opticamente de uma ligação física para outra e em alguns casos podem ser convertidos do comprimento de onda original para outro. Isto permite que o mesmo comprimento de onda possa ser reutilizado em diferentes partes da rede. A Figura 33 ilustra uma rede de comutação óptica com seis caminhos de luz diferentes e apenas dois comprimentos de onda.

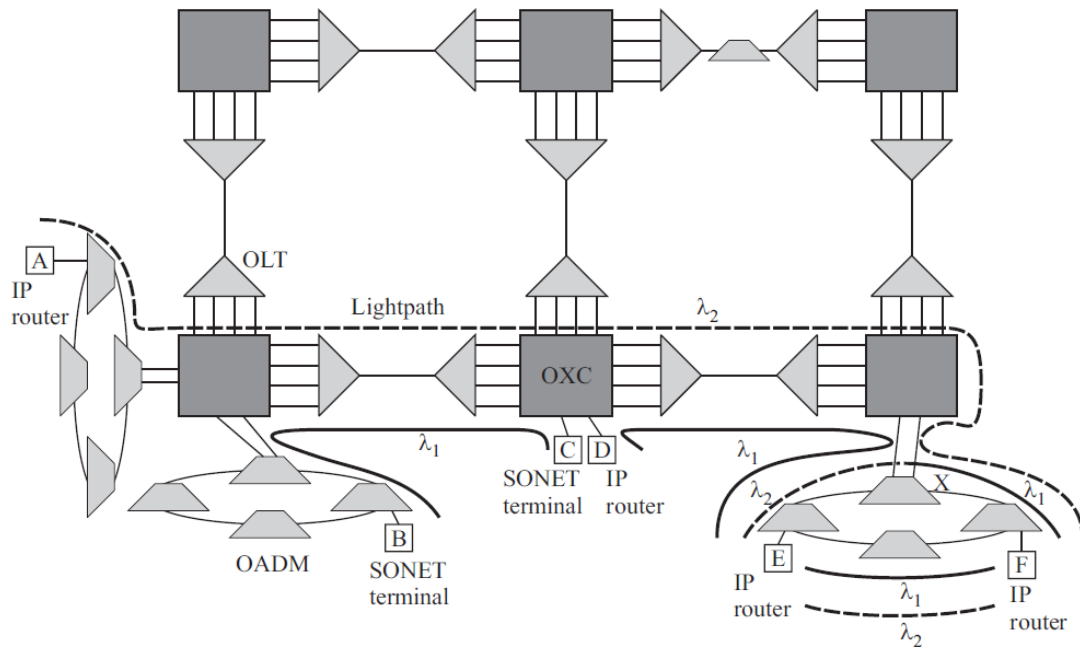


Figura 33 – Exemplo de uma rede WDM que proporciona caminhos de luz aos seus utilizadores. [43]

A maior parte das redes actuais que recorrem à técnica de WDM e efectuem a multiplexagem de informação em diferentes comprimentos de onda. A utilização de redes WDM traz algumas vantagens, tais como: [29, 30, 43]

- ⊕ O aumento do número de canais que podem ser enviados através da mesma fibra, implicando um aumento do débito binário suportado por cada fibra óptica.
- ⊕ Grande facilidade e flexibilidade para o crescimento da rede.
- ⊕ O aumento dos recursos da rede (como os caminhos ópticos) através do planeamento e da conversão dos comprimentos de onda.
- ⊕ A transparência da rede, ou seja, os dados enviados em diferentes caminhos de luz podem conter diferentes débitos binários, modulações e protocolos, proporcionando assim interoperabilidade entre sistemas (exemplo Figura 33: um comprimento de onda pode transportar pacotes IP e outro comprimento de onda pode ser SONET/SDH) aumentando assim as possibilidades de evolução da rede (*future-proof*).
- ⊕ O equipamento utilizado, em especial equipamento intermédio da rede (amplificadores e comutadores), pode ser menos complexo do que em outros sistemas de transmissão (*e.g.*, par entrelaçado, cabo coaxial), pois as redes WDM podem ser completamente ópticas, não recorrendo à conversão óptico-eléctrico-óptico. No caso de ser uma rede passiva existe a redução dos custos de

manutenção da rede e dos custos para fornecer energia ao equipamento intermédio.

No entanto existem também algumas desvantagens em redes WDM: [29, 30, 43]

- Ⓢ Quanto mais passiva for a rede, maiores são as limitações de algumas funções (*e.g.*, conversão de comprimento de onda, regeneração do sinal, *buffering*, *grooming*), ou seja, menos inteligência e flexibilidade a rede tem, já que é no fundo uma rede de comutação de circuitos.
- Ⓢ Existência de dispersão cromática.
- Ⓢ Existência de efeitos não lineares.

2.2.4.1 Amplificadores e repetidores

À medida que o sinal óptico se propaga, vai sofrendo com os efeitos da atenuação, dispersão e dos efeitos não lineares. Se o sinal chegar ao receptor sem potência suficiente, este não consegue detectá-lo. Como tal é necessário amplificar ou regenerar o sinal óptico. [29]

Existem vários tipos de amplificadores ópticos, tais como o EDFA e o SOA (*Semiconductor Optical Amplifier*), sendo o primeiro, o mais utilizado. O EDFA é pouco mais que uma fibra monomodo comum, na qual é dopada com érbio durante a sua construção. A Figura 34 mostra a constituição de um amplificador EDFA. O amplificador é uma fibra com cerca de 10 m de comprimento. Para compensar o sinal de entrada fraco, um comprimento de onda forte (exemplo 980 nm) é bombeado para a secção de amplificação e é misturado com o sinal de entrada (exemplo 1550 nm), fazendo com que os iões de érbio na fibra EDFA atinjam um estado de energia mais elevada. Ao serem atingidos os iões de érbio, a energia transportada pelos iões é transferida para o sinal de entrada, intensificando-o. Para evitar que a fibra de érbio dopado se torne num laser, um isolador óptico é utilizado para evitar reflexões. [29]

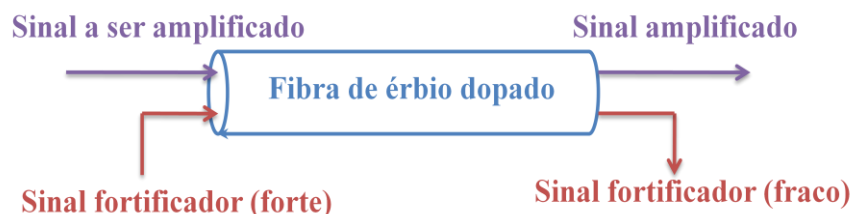


Figura 34 – Amplificador EDFA. Baseado em [29]

Para além dos amplificadores ópticos, existem também os repetidores. Estes são dispositivos O-E-O (óptico-elétrico-óptico) que não só amplificam o sinal, como também o corrigem e sincronizam. Os regeneradores são equipamentos dispendiosos devido à sua composição (conversor de O-E-O, circuitos receptores, regenerador de sinal, circuitos transmissores e uma

fonte de luz). Para além do custo, um repetidor exige uma taxa de bits e formato de modulação específica de forma a refazer o sinal. Já os amplificadores ópticos são transparentes em relação à taxa de bits ou ao formato do sinal, sendo capazes de amplificar vários sinais WDM de uma só vez, pois têm uma largura de banda bastante elevada. A principal desvantagem dos amplificadores ópticos é que estes vão amplificar o sinal todo, incluindo o ruído e a distorção que possa existir. [29]

2.2.4.2 Optical Add/Drop Multiplexer

Tal como o nome indica, as funcionalidades do OADM (*Optical Add/Drop Multiplexer*) são, adicionar, retirar ou deixar passar comprimentos de onda em nós de redes WDM. A Figura 35 mostra uma possível estrutura de um OADM. Nesta existem quatro fibras de entrada e quatro de saída, cada fibra suportando dez comprimentos de onda. Os sinais de entrada são desmultiplexados nos seus diferentes comprimentos de onda. O sinal desmultiplexado pode seguir directamente até ao multiplexador de saída sem alterar o seu comprimento de onda, ou pode ser extraído através das interfaces de saída utilizando *transponders*. Da mesma forma que um canal num determinado comprimento de onda pode ser retirado, outro canal pode ser adicionado nesse comprimento de onda. Os comprimentos de onda de saída são depois multiplexados e injectados nas fibras de saída. Os portos adição/extracção representam as entradas e saídas da rede WDM. A utilização de *transponders* em redes WDM, faz com que o custo destas aumente. [29, 44]

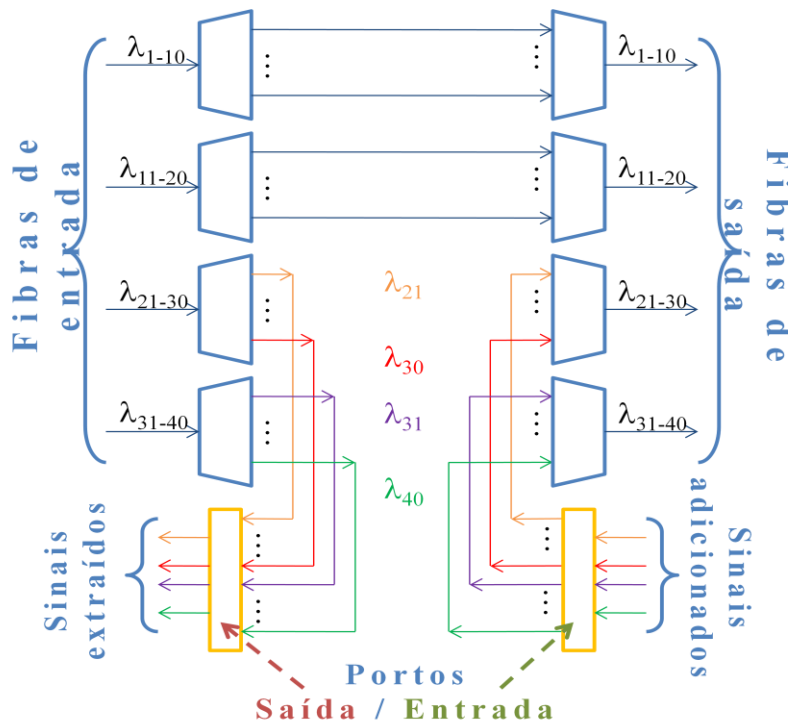


Figura 35 – Optical Add/Drop Multiplexer (OADM). Baseado em [29]

2.2.4.3 Optical Crossconnect

Os OADM são equipamentos que conseguem seleccionar canais de comprimentos de onda, no entanto estes não efectuem comutação. Esta capacidade é fornecida pelo OXC (*Optical Crossconnect*). A Figura 36 mostra uma possível estrutura de um OXC. Nesta existem quatro fibras de entrada e quatro de saída, cada fibra suportando n comprimentos de onda. Um sinal de entrada é desmultiplexado nos seus diferentes comprimentos de onda, podendo ser ou não encaminhado para o multiplexador de saída. A configuração de um comutador pode levantar problemas de concorrência nas fibras de saída, ou seja, vários sinais em entradas diferentes com o mesmo comprimento de onda podem querer utilizar a mesma fibra de saída. Para tentar resolver este problema é necessário converter alguns dos comprimentos de onda. Esta conversão pode degradar a qualidade do sinal, sendo que só deve ser utilizada em casos estritamente necessários. [29]

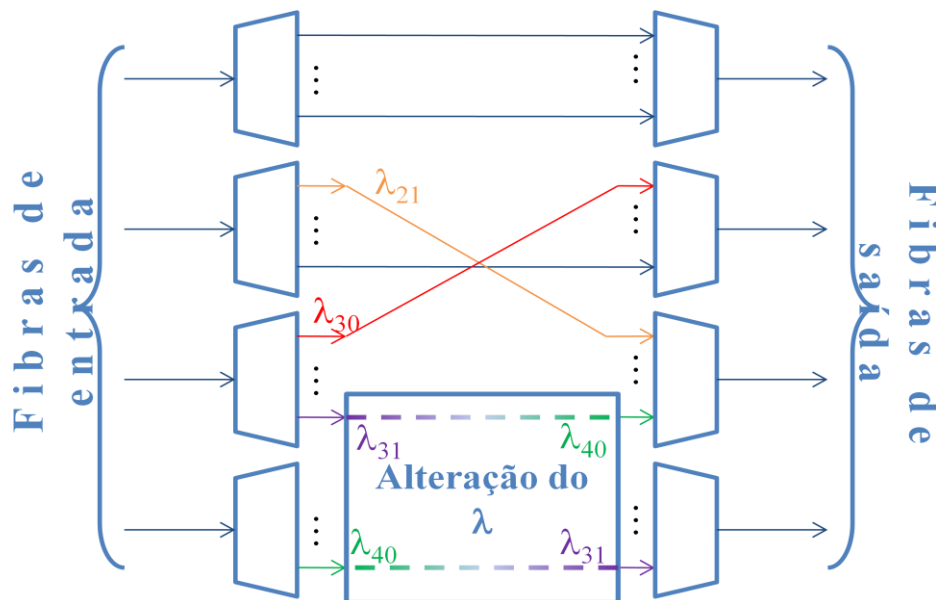


Figura 36 – Optical Crossconnect (OXC). Baseado em [29]

2.2.4.4 Transponder

Para além dos regeneradores, outro o componente que tem a importante tarefa de corrigir automaticamente as imperfeições ópticas acumuladas durante a transmissão é o *transponder*. Este também tem a capacidade de efectuar conversões O-E-O e de converter comprimentos de onda. No entanto é um equipamento que necessita de ser bastante preciso e que normalmente está ajustado apenas a um comprimento de onda de entrada, embora exista em investigação a utilização de *transponders* sintonizáveis. A regeneração e conversão do sinal óptico fazem do transponder um equipamento dispendioso, o que aumenta bastante o custo das redes ópticas. [29]

2.3 IP sobre WDM

Introduzidos alguns dos conceitos por detrás do IP e das redes ópticas, é necessário falar da combinação das duas, expondo três arquitecturas de IP sobre WDM: IP sobre WDM ponto-a-ponto, IP sobre WDM re-configurável e IP sobre WDM comutável. [29]

2.3.1 IP sobre WDM ponto-a-ponto

Nas arquitecturas IP sobre WDM ponto-a-ponto são utilizadas ligações ópticas WDM ponto-a-ponto para transportar serviços IP. Embora seja utilizado equipamento como o OADM, este apenas serve para fornecer uma camada física à rede, sendo que os pacotes IP são encapsulados, por exemplo, em tramas de transmissão SONET/SDH. Estas arquitecturas requerem que os routers IP estejam ligados directamente entre si, através de conexões em fibra óptica com múltiplos comprimentos de onda, tal como demonstra a Figura 37. Neste tipo de arquitectura cada router tem uma interface fixa para os routers vizinhos e as configurações da rede são estáticas. [29]

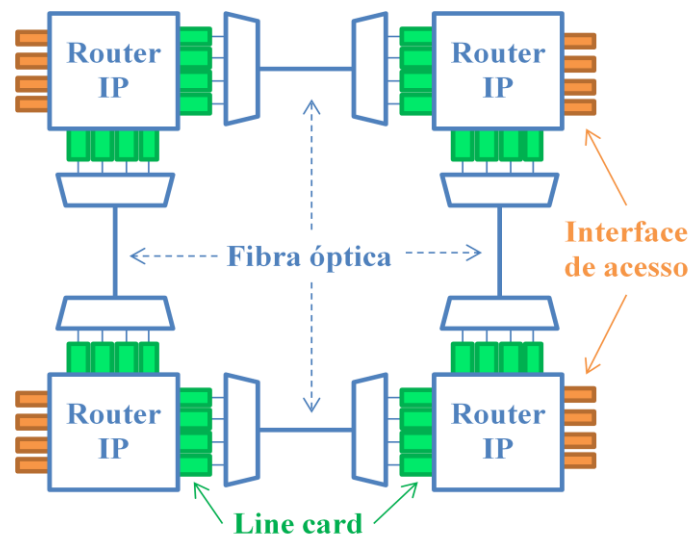


Figura 37 – IP sobre WDM ponto-a-ponto. Baseado em [29]

2.3.2 IP sobre WDM reconfigurável

A arquitectura IP sobre WDM reconfigurável, ao contrário da anterior, não tem os routers IP ligados directamente entre si, Figura 38. Assim nesta arquitectura a topologia física é diferente da topologia virtual. A topologia física é composta por equipamento de rede interligado por fibra óptica, tais como o OXC e o OADM, onde é efectuada a comutação dos comprimentos de onda. A topologia virtual é composta pelos caminhos ópticos e pelos routers IP onde é efectuada a comutação do tráfego IP. Para fazer a ligação entre a topologia física e a virtual são utilizadas interfaces em fibra óptica. [29]

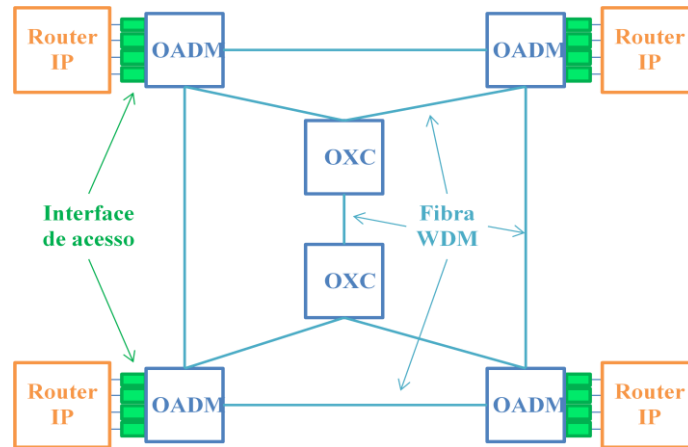


Figura 38 – IP sobre WDM reconfigurável. Baseado em [29]

2.3.3 IP sobre WDM comutável

As arquitecturas anteriores utilizam comutação óptica por circuitos. Pelo contrário, a arquitectura IP sobre WDM comutável é baseada noutros tipos comutação óptica, sendo as mais usuais a comutação óptica por rajadas e por pacotes. Em ambas a ideia é obter uma rede de comutação completamente óptica para o tráfego. A Figura 39 demonstra o princípio base da comutação óptica por rajadas, mas este princípio é o mesmo para pacotes, a diferença está na granularidade do que é transportado. Este tipo de arquitecturas pode ser visto como uma rede física que suporta duas redes paralelas, num comprimento de onda circulam apenas os cabeçalhos de controlo dos pacotes, os quais requerem conversão O-E-O para serem analisados. Nos outros comprimentos de onda circulam apenas os pacotes com tráfego de dados, que não necessitam de ser convertidos de óptico para eléctrico (e vice-versa), pois não necessitam de ser analisados. Para esta arquitectura funcionar, é necessário que os cabeçalhos enviados no comprimento de onda de controlo tenham uma margem temporal de avanço, para se poderem efectuar as conversões O-E-O, analisar os cabeçalhos e alterar as configurações dos comutadores ópticos para os comprimentos de onda que contêm os pacotes de dados.

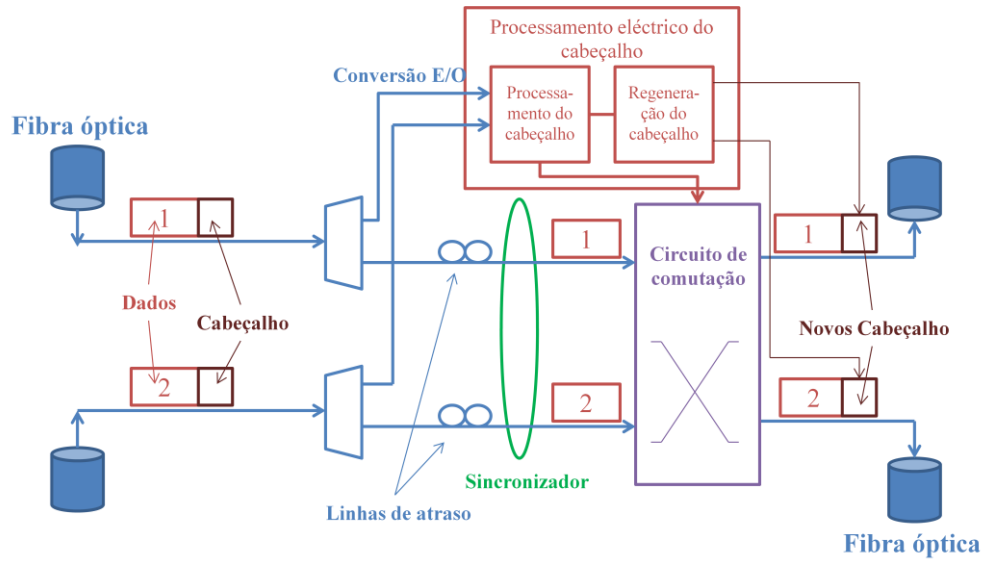


Figura 39 – IP sobre WDM comutável. Baseado em [29]

Capítulo 3: Modelo de optimização energético para redes ópticas

O principal objectivo deste trabalho é o estudo da eficiência energética em núcleos de redes IP sobre WDM. Apesar de actualmente estas redes consumirem apenas uma pequena percentagem do total do consumo energético da rede [3], esta percentagem tem tendência a aumentar devido ao aumento do tráfego exigido, provocado, por exemplo, pela introdução de aplicações de alta definição como o IPTV. Outro motivo importante pelo qual é necessário reduzir o consumo energético destas redes é a elevada densidade energética existente nos edifícios que albergam os seus componentes, da qual advêm grandes custos operacionais para as operadoras.

Uma maneira para reduzir o consumo energético em redes ópticas é através da utilização de arquitecturas IP sobre WDM reconfiguráveis, visto que estas utilizam equipamentos como OADM e OXC, proporcionando a capacidade de adicionar e retirar, apenas os comprimentos de onda que necessitam de ser processados pelos routers IP. Desta forma, os comprimentos de onda que não necessitam de ser processados electronicamente nesse nó, são comutados de forma puramente óptica para a saída correspondente, evitando as onerosas (do ponto de vista energético) conversões O-E-O. A utilização desta técnica de *optical bypass* permite reduzir a quantidade de portas IP activas em cada nó, reduzindo conseqüentemente o seu consumo energético. É esta a técnica fundamental utilizada neste trabalho de optimização energética.

Com base neste conceitos, desenvolveu-se um modelo de optimização MILP com base no modelo proposto em [3]. O objectivo é minimizar o consumo energético das redes IP sobre WDM, tendo em conta o consumo dos seus componentes, ao invés do objectivo mais comum de

minimização do atraso médio de pacote ou do custo total da rede, como no caso de [45, 46, 47]. Assim sendo, o modelo apresentado difere dos modelos tradicionais da seguinte forma:

- ⊗ Primeiro, ao contrário dos modelos tradicionais que minimizam o tráfego máximo em cada ligação, ou o atraso máximo dos pacotes, o modelo aqui desenvolvido minimiza o consumo energético total da rede, otimizando o número de routers IP, EDFAs e *transponders*, em função do seu próprio consumo.
- ⊗ Segundo, em vez de otimizar única e exclusivamente o tráfego da rede como nos modelos que descrevem as topologias virtuais tradicionais, o modelo de eficiência energética também tem em conta a distribuição dos EDFAs consoante as ligações físicas existentes, o número de EDFAs em função da capacidade de cada comprimento de onda e o consumo energético dos transponder, EDFA e routers IP.
- ⊗ Terceiro, o modelo desenvolvido tem em consideração não só o número de portas IP necessários para estabelecer as ligações na rede, como também, o número de portas necessários para agregar tráfego dos routers de nível inferior. Já os modelos tradicionais, apenas consideram os portas IP necessários para estabelecer as ligações virtuais entre os comutadores ópticos.

3.1 Variáveis e parâmetros do modelo

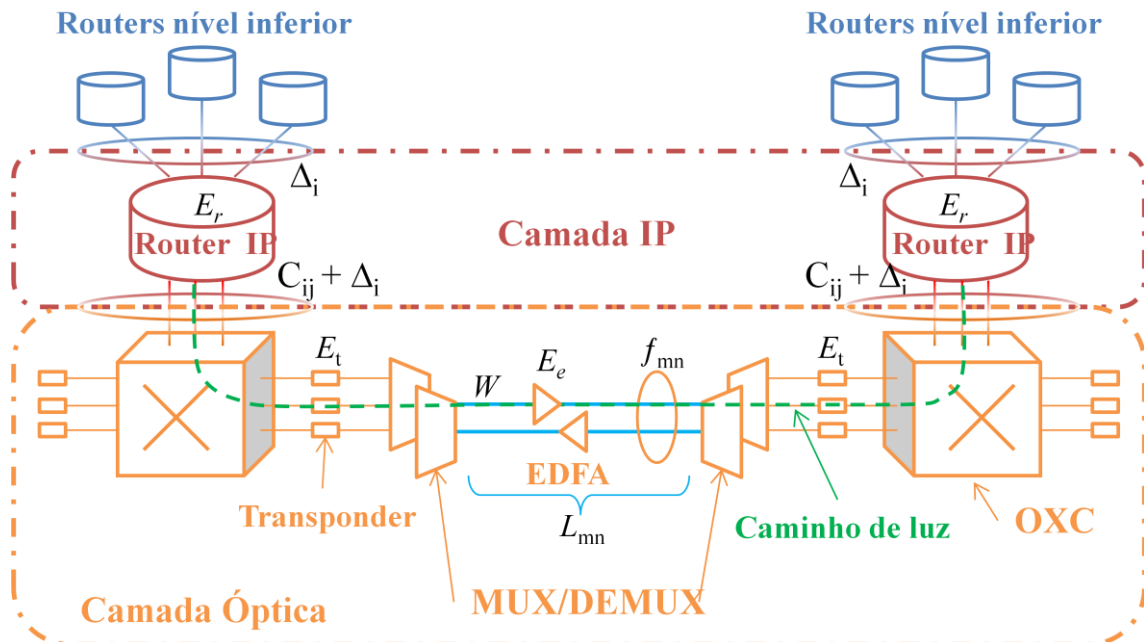


Figura 40 – Arquitectura da rede IP sobre WDM do modelo utilizado. Baseado em [3].

O modelo MILP para resolver este problema requer que sejam definidos alguns parâmetros de entrada, apresentados na Figura 40:

- ⊙ A topologia física $G_p = (N, E)$, composta por N nós e E ligações físicas. Em cada um destes nós existem comutadores ópticos ligados a routers IP. As ligações entre nós são efectuadas com fibra óptica.
- ⊙ A matriz de previsão do consumo de tráfego entre cada nó λ^{sd} .
- ⊙ O número de comprimento de onda, W , suportados por cada fibra e a sua capacidade, B , em Gbps.
- ⊙ O número máximo de portos de router IP, ∇^i , em cada nó.
- ⊙ O consumo médio de cada componente usado no modelo: E_r é o consumo médio da cada porta dos routers IP, E_t é o consumo médio de cada transponder e E_e é consumo médio de cada amplificador EDFA.

É ainda necessários definir índices com significados diferentes, variáveis de decisão e parâmetros. Os índices estão definem-se da seguinte maneira:

- m, n Índice dos nós de origem m e de destino n da topologia física (camada óptica)
- i, j Índice dos nós de origem i e de destino j da topologia lógica (camada IP)
- s, d Índice dos nós de origem s e de destino d do tráfego ponto-a-ponto.

Para além dos parâmetros introduzidos anteriormente ($G_p, \lambda^{sd}, W, B, \nabla^i, E_r, E_t$ e E_e), define-se ainda os seguintes parâmetros, de acordo com a Figura 40:

L_{mn} Distância física entre os nós m e n , necessária para se determinar o número de EDFAs necessários em cada ligação.

A_{mn} Número de EDFAs em cada ligação física entre m e n . Este é obtido através da seguinte equação:

⊙ $A_{mn} = \left\lceil \frac{L_{mn}}{S} - 1 \right\rceil + 2$, onde S é a distância máxima entre dois amplificadores EDFA. $\left\lceil \frac{L_{mn}}{S} - 1 \right\rceil$ é o número de EDFA e o factor $+2$ é devido ao pré e pós-amplificador existente nos nós.

Δ_i Número de portas que agrega dados em routers de nível inferior, ou seja, o número de portas que agrega ou fornece tráfego a routers que não fazem parte do núcleo da rede. Este número é calculado através da seguinte equação:

⊙ $\Delta_i = (\sum_{d \in N} \lambda^{id}) / B$

Finalmente, é necessário definir as variáveis de decisão, ou seja, as variáveis utilizadas pelo modelo para que o objectivo deste seja atingido. Assim sendo, as variáveis de decisão são as seguintes:

C_{ij}	Número de canais de comprimentos de onda na ligação virtual entre (i, j) (Valor inteiro)
λ_{ij}^{sd}	Quantidade de tráfego de s para d que atravessa a ligação virtual (i, j) (Valor real)
w_{mn}^{ij}	Número de canais de comprimento de onda entre (i, j) que atravessa a ligação física (m, n) (Valor inteiro)
w_{mn}	Número de canais de comprimento de onda na ligação física (m, n) (Valor inteiro)
f_{mn}	Número de fibras na ligação física (m, n) (Valor inteiro)

3.2 Objectivo e restrições do modelo

O objectivo do problema pode ser formulado matematicamente da seguinte maneira:

Objectivo: minimizar

$$\sum_{i \in N} E_r \cdot \left(\Delta_i + \sum_{j \in N: i \neq j} C_{ij} \right) + \sum_{m \in N} \sum_{n \in N: m \neq n} E_t \cdot w_{mn} + \sum_{m \in N} \sum_{n \in N: m \neq n} E_e \cdot A_{mn} \cdot f_{mn}$$

Analisando o objectivo verifica-se que este está formulado em 3 blocos. O primeiro bloco, $\sum_{i \in N} E_r \cdot (\Delta_i + \sum_{j \in N: i \neq j} C_{ij})$, corresponde ao consumo total de energia da camada IP, onde se inserem tanto as portas dos routers que agregam dados, Δ_i , bem como as portas que estão ligadas aos comutadores ópticos, $\sum_{j \in N: i \neq j} C_{ij}$. O segundo bloco, $\sum_{m \in N} \sum_{n \in N: m \neq n} E_t \cdot w_{mn}$, corresponde ao consumo de energia associado aos *transponders* na camada óptica. O terceiro bloco, $\sum_{m \in N} \sum_{n \in N: m \neq n} E_e \cdot A_{mn} \cdot f_{mn}$, corresponde ao consumo total dos amplificadores EDFA

O objectivo a atingir está sujeito a um conjunto de restrições. Este modelo tem que seguir as seguintes restrições:

- Ⓜ Garantir que a rede suporta o tráfego exigido.
- Ⓜ Respeitar o limite máximo de comprimentos de onda que podem ser alocados em cada fibra.
- Ⓜ Respeitar o limite máximo de portas dos routers IP.

Assim sendo as restrições podem ser definidas utilizando a seguinte formulação matemática:

Restrições:

$$\sum_{j \in N: i \neq j} \lambda_{ij}^{sd} - \sum_{j \in N: i \neq j} \lambda_{ji}^{sd} = \begin{cases} \lambda^{sd} & i = s \\ -\lambda^{sd} & i = d \\ 0 & \text{outros} \end{cases}$$

$$\forall s, d, i \in N: s \neq d \quad (1)$$

A primeira restrição (1) representa a conservação do fluxo na camada IP. De uma forma simplista, a equação indica que do nó de origem do tráfego, s , saem λ^{sd} Gbps para o nó de destino, d . Para os restantes nós intermédios de uma ligação, todo o tráfego que chega tem que partir, daí que a expressão $\sum_{j \in N: i \neq j} \lambda_{ij}^{sd} - \sum_{j \in N: i \neq j} \lambda_{ji}^{sd}$ seja igual a zero.

$$\sum_{s \in N} \sum_{d \in N: s \neq d} \lambda_{ij}^{sd} \leq C_{ij} \cdot B$$

$$\forall i, j \in N: i \neq j \quad (2)$$

A segunda restrição (2), define que cada caminho de luz tem de ter capacidade para alocar todo o tráfego que transporta.

$$\sum_{j \in N: i \neq j} C_{ij} + \Delta_i \leq \nabla^i \quad \forall i \in N \quad (3)$$

$$\sum_{i \in N: i \neq j} C_{ij} + \Delta_j \leq \nabla^j \quad \forall i \in N \quad (4)$$

A terceira (3) e quarta (4) restrições têm o intuito de garantir que o número total de portas em cada router IP não excede o seu limite de ∇^i .

$$\sum_{n \in N: i \neq j} w_{mn}^{ij} - \sum_{n \in N: i \neq j} w_{nm}^{ij} = \begin{cases} C_{ij} & m = i \\ -C_{ij} & m = j \\ 0 & \text{outros} \end{cases}$$

$$\forall i, j, m \in N: i \neq j \quad (5)$$

A quinta restrição (5) é semelhante à primeira, visto que se trata de mais uma conservação de fluxo, mas ao invés de ser a conservação do fluxo de tráfego, é a conservação do fluxo de canais WDM. Todos os canais que chegam a um nó intermédio têm sair desse nó intermédio.

$$\sum_{i \in N} \sum_{j \in N: i \neq j} w_{mn}^{ij} \leq W \cdot f_{mn} \quad \forall m, n \in N: m \neq n \quad (6)$$

A sexta restrição (6) tem o intuito de garantir que todas as fibras ópticas entre dois nós têm capacidade para suportar todo o tráfego que circula entre esses dois nós.

$$w_{mn} = \sum_{i \in N} \sum_{j \in N: i \neq j} w_{mn}^{ij} \quad \forall m, n \in N: m \neq n \quad (7)$$

A sétima restrição (7) não faz parte do modelo apresentado em [3]. No entanto, sem esta o segundo bloco do objectivo era ignorado ($\sum_{m \in N} \sum_{n \in N_m} E_t \cdot w_{mn}$), visto que nenhuma restrição era imposta quanto aos valores da variável de decisão w_{mn} . Como tal o optimizador atribuía-lhe o valor zero, indicando que os transponder não eram necessários.

Capítulo 4: Avaliação do modelo de otimização

Neste capítulo é efectuada a avaliação do modelo de optimização MILP apresentado no capítulo anterior. Este modelo foi testado em várias topologias de rede diferentes, sendo que a implementação deste efectuada através da plataforma *IBM ILOG CPLEX Optimization Studio*, versão 12. Para avaliar a mais-valia, a nível energético, da utilização deste mecanismo de optimização, comparou-se o seu consumo energético com o dos protocolos de encaminhamento tradicionais, baseados no algoritmo de Dijkstra. A implementação deste algoritmo foi obtida em [48], sendo depois adaptada para calcular o consumo energético da rede, através da plataforma *Eclipse*, versão 3.4.2.

Como se disse atrás, ambos os modelos foram testados em 4 tipos de topologias, anel, estrela, híbrida e malha. O intuito de efectuar estes testes é o de avaliar qual das topologias é mais eficiente energeticamente, como é que o número de nós pode afectar a eficiência energética nestas topologias e como varia o consumo energético como o aumento do tráfego. Finalmente testaram-se ambos os modelos com a configuração física da rede NSFNET (*National Science Foundation Network*), com o intuito de verificar o comportamento energético numa rede real. Esta escolha, deve-se ao facto de a NSFNET ser uma rede de referência muito utilizada em trabalhos relacionados [3].

Parâmetros dos modelos

Os parâmetros de entrada utilizados são os seguintes:

- Ⓢ O custo das ligações é determinado pelo comprimento (L_{mn}) das mesmas em km e está identificado nas respectivas figuras, sendo que este foi obtido através de uma distribuição uniforme, onde esta distribuição está contida no intervalo [10, 100], com excepção da topologia real NSFNET.
- Ⓢ O tráfego entre cada par (origem, destino) (λ^{sd}) é aleatório, obedecendo a uma distribuição uniforme. A distribuição está contida no intervalo [10, 2X] Gbps, na qual $X \in \{20, 40, 60, 80, 100\}$ Gbps.
- Ⓢ Para cada um dos 5 valores do intervalo de tráfego médio foram efectuados 10 testes, de forma a obter uma margem de erro, sendo que os resultados apresentados neste capítulo, resultam da média dos 10 testes efectuados. Nos gráficos apresentam-se também os valores de percentil-10 e percentil-90.
- Ⓢ A distância física entre dois amplificadores EDFA (S) é de 80 km. No entanto existe sempre um pré e um pós-amplificador em cada ligação, independentemente do comprimento desta.
- Ⓢ Existem no máximo 16 comprimentos de onda por fibra (W). No entanto não existe limite para o número de fibras por ligação, de forma a não restringir a optimização dos testes realizados.
- Ⓢ A capacidade de cada comprimento de onda (B) é de 40 Gbps.
- Ⓢ O consumo de cada porta IP (E_r) é de 1000 W, baseado em [49].
- Ⓢ O consumo de cada transponder WDM (E_t) é de 73 W, baseado em [52].
- Ⓢ O consumo de cada EDFA (E_e) é de 8 W, baseado em [52].
- Ⓢ O número máximo de portas de router (∇^i) é ilimitado de forma a não restringir a optimização dos testes realizados.

Topologias em anel

A primeira topologia analisada é uma rede em anel, formada por 5 nós e com 5 ligações, $(G_p = (5,5))$ tal como apresentado na Figura 41.

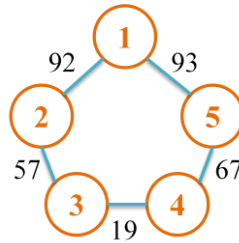


Figura 41 – Rede em anel com 5 nós e 5 ligações.

Analisando a Figura 42 e a

Tabela 9, é possível verificar uma redução do consumo energético entre os 23% e os 29%, quando é utilizado o modelo MILP, em relação ao consumo energético quando o encaminhamento é obtido utilizando o algoritmo de Dijkstra. Também é possível verificar um ligeiro aumento da eficiência energética à medida que o tráfego exigido aumenta.

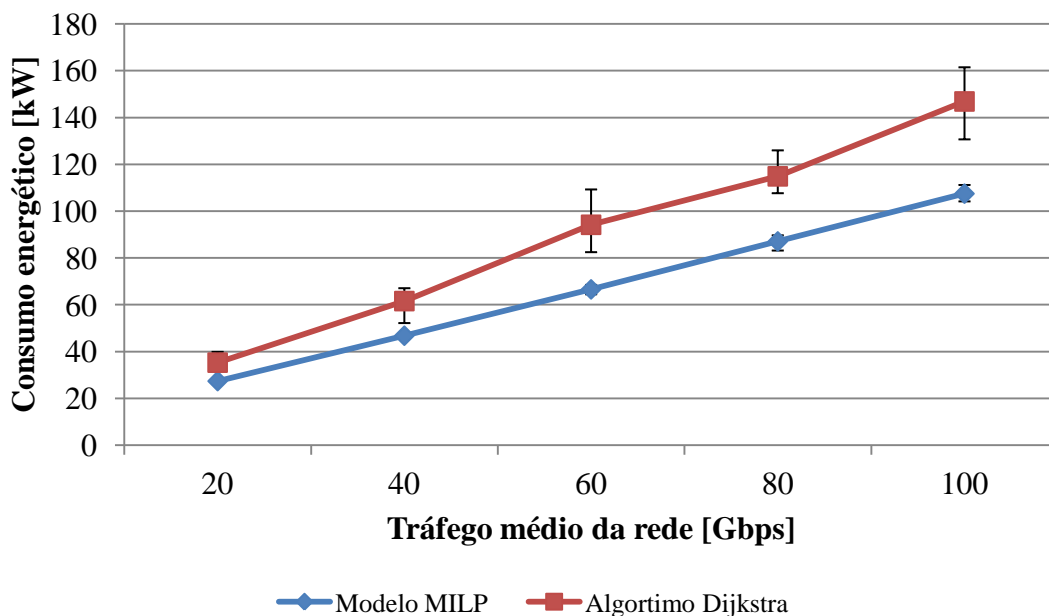


Figura 42 – Consumo energético da rede em anel com 5 nós e 5 ligações.

Tabela 9 – Valores do consumo energético da rede com anel de 5 nós e 5 ligações.

Tráfego médio [Gbps]	Modelo MILP [kW]	Algoritmo Dijkstra [kW]	Redução percentual
20	27.2	35.4	23%
40	46.8	61.6	24%
60	66.6	94.2	29%
80	87.1	114.9	24%
100	107.1	146.9	27%

De seguida aumentou-se o número de nós da rede em anel. Para tal foi criada uma segunda formada por 9 nós e 9 ligações ($G_p = (9,9)$), como apresentado na Figura 43.

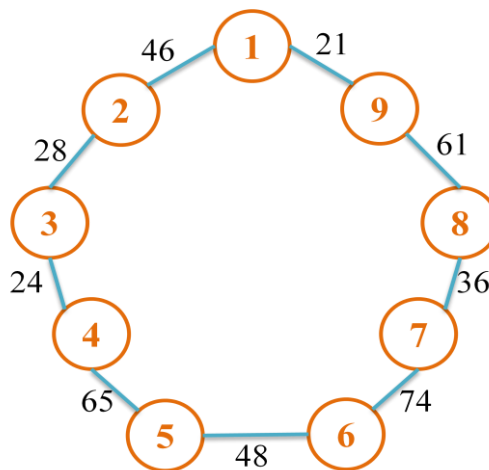


Figura 43 – Rede em anel com 9 nós e 9 ligações.

Através da Figura 44 e da

Tabela 10 é possível verificar uma redução do consumo energético do modelo MILP em comparação com o algoritmo de Dijkstra, com reduções entre os 23% e os 30%. É também possível verificar que esta rede não se torna mais eficiente quanto maior for o tráfego exigido. Em termos médios, pode então concluir-se que não existe uma melhoria significativa da eficiência energética da rede quando o número de nós aumenta. Isto deve-se ao facto das redes em anel serem redes com poucas alternativas para o seu encaminhamento.

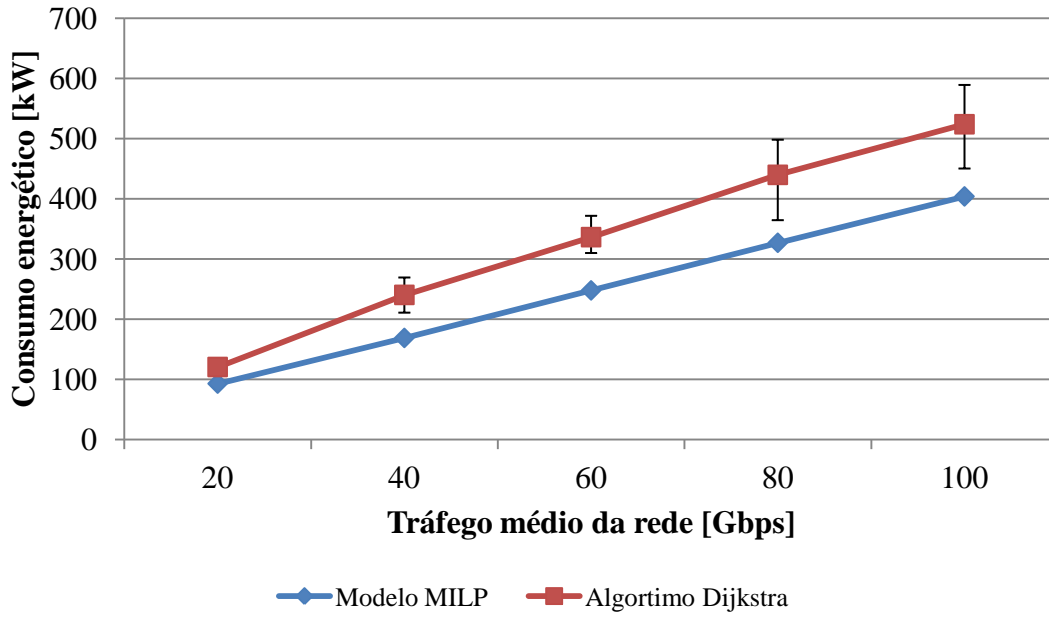


Figura 44 – Consumo energético da rede em anel com 9 nós e 9 ligações.

Tabela 10 – Valores do consumo energético da rede em anel com 9 nós e 9 ligações.

Tráfego médio [Gbps]	Modelo MILP [kW]	Algoritmo Dijkstra [kW]	Redução percentual
20	92.8	120.4	23%
40	168.7	240.2	30%
60	247.7	336.3	26%
80	326.8	439.8	26%
100	403.9	532.9	24%

Topologias em estrela

De seguida foram testadas duas topologias em estrela, sendo a primeira uma rede em estrela formada por 5 nós e 4 ligações ($G_p = (5,4)$), de acordo com a Figura 45.

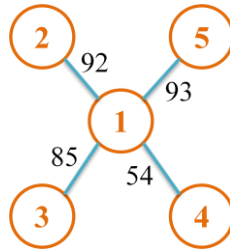


Figura 45 – Rede em estrela com 5 nós e 4 ligações.

Através da observação da Figura 46 e da Tabela 11 é possível verificar que o modelo MILP apresenta uma redução do consumo energético em comparação com o algoritmo de Dijkstra, entre os 10% e os 24%, mas a eficiência desta rede não melhora com o aumento do tráfego. Quando comparada com a rede em anel com 5 nós, a rede em estrela obteve valores de consumo energéticos um pouco inferiores. A razão prende-se com o facto da topologia em anel oferecer maiores oportunidades de *optical bypass*, quando comparada com a rede em estrela.

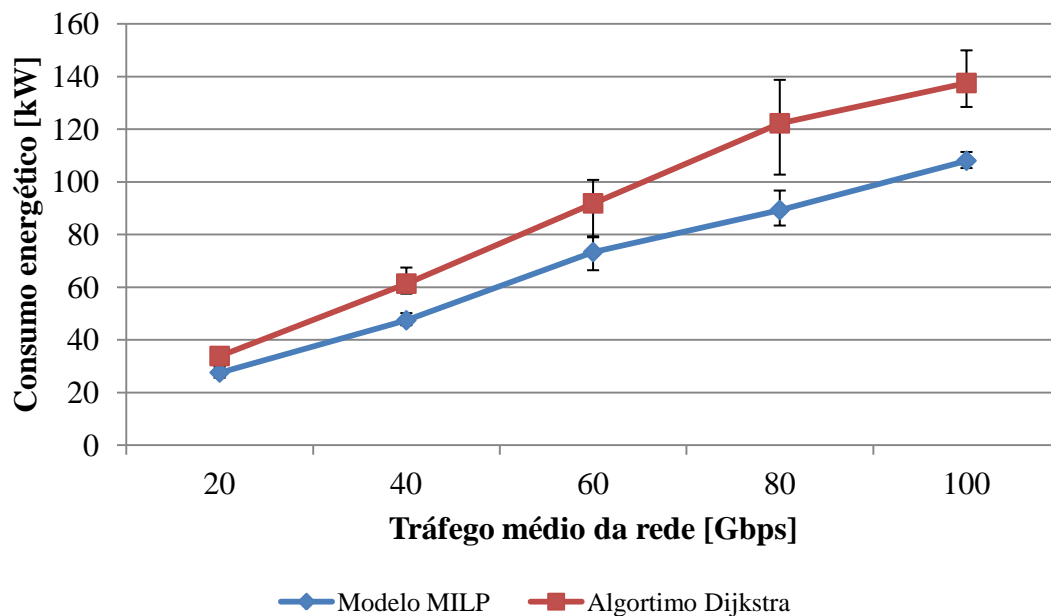


Figura 46 – Consumo energético da rede em estrela com 5 nós e 4 ligações.

Tabela 11 – Valores do consumo energético da rede em estrela com 5 nós e 4 ligações.

Tráfego médio [Gbps]	Modelo MILP [kW]	Algoritmo Dijkstra [kW]	Redução percentual
20	27.5	33.5	18%
40	47.4	59.8	21%
60	73.3	88.0	17%
80	89.3	98.7	10%
100	108.1	142.9	24%

Na segunda rede em estrela testada, aumentou-se o número de nós, sendo esta composta por 9 nós e 8 ligações ($G_p = (9,8)$), de acordo com a Figura 47.

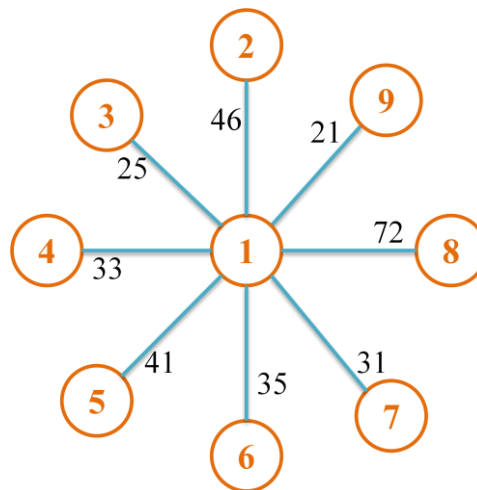


Figura 47 – Rede em estrela com 9 nós e 8 ligações.

O uso do modelo MILP, na rede em estrela com 9 nós, resultou numa redução do consumo energético entre os 19% e os 30%, tal como pode ser verificado na Figura 48 e na Tabela 12. No entanto, e ao contrário da rede em estrela mais pequena, a rede com 9 nós obteve uma melhoria da eficiência consoante o tráfego exigido aumentava. O aumento do número de nós faz com que a rede em termos médios melhore ligeiramente a sua eficiência. Já quando comparada a rede em estrela com a rede em anel, ambas com 9 nós, verifica-se que o consumo e a eficiência energética são bastante semelhantes.

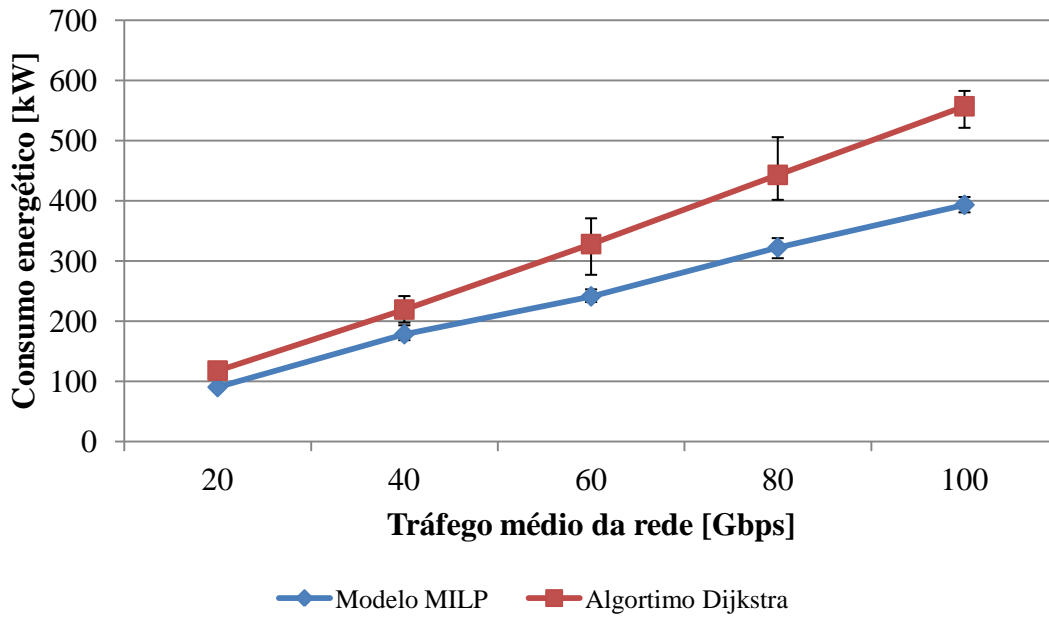


Figura 48 – Consumo energético da rede em estrela com 9 nós e 8 ligações.

Tabela 12 – Valores do consumo energético da rede em estrela com 9 nós e 8 ligações.

Tráfego médio [Gbps]	Modelo MILP [kW]	Algoritmo Dijkstra [kW]	Redução percentual
20	90.3	117.9	23%
40	178.2	219.3	19%
60	241.1	328.1	27%
80	322.4	443.4	27%
100	393.2	557.9	30%

Topologias híbridas

A próxima topologia a ser estudada foi a topologia híbrida. Esta é uma combinação entre a rede em anel e em estrela e é formada por 5 nós e 8 ligações ($G_p = (5,8)$), como apresentado na Figura 49.

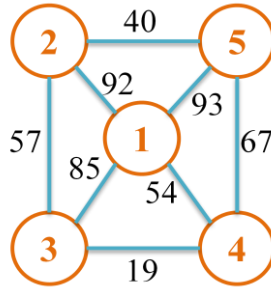


Figura 49 – Rede híbrida com 5 nós e 8 ligações.

Da análise da Figura 50 e da Tabela 13, verificou-se uma eficiência energética quando é utilizado o modelo MILP entre os 16% e os 21%. Também se notou uma ligeira melhoria da eficiência, quando o tráfego da rede aumenta. Quanto ao consumo desta rede é bastante semelhante ao da rede em anel e em estrela. Já em termos de eficiência, nota-se que esta rede tem um desempenho ligeiramente pior que a rede em anel, mas semelhante ao da rede em estrela.

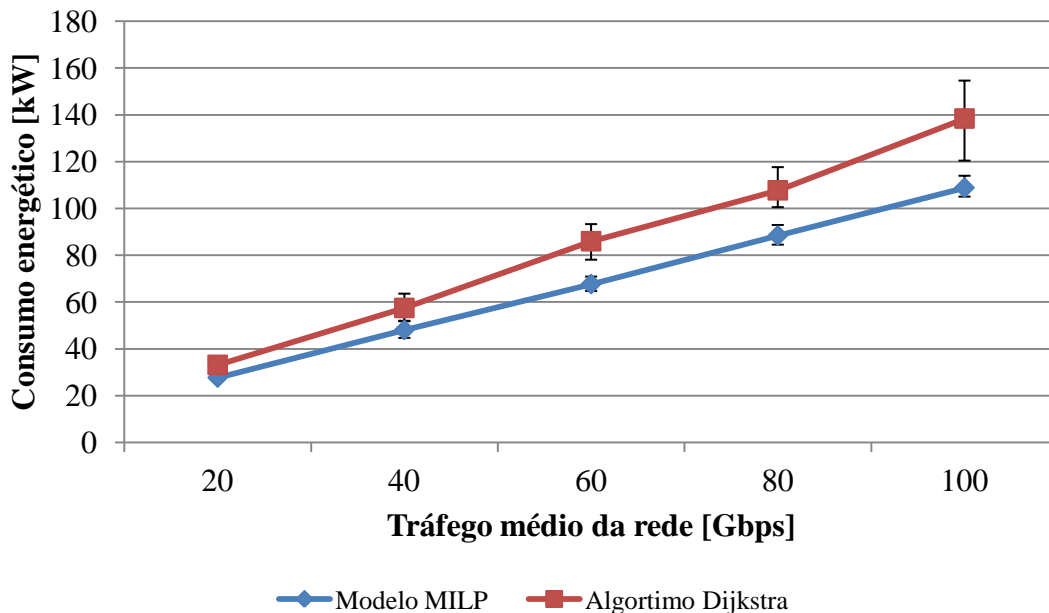


Figura 50 – Consumo energético da rede híbrida com 5 nós e 8 ligações.

Tabela 13 – Valores do consumo energético da rede híbrida com 5 nós e 8 ligações.

Tráfego médio [Gbps]	Modelo MILP [kW]	Algoritmo Dijkstra [kW]	Redução percentual
20	27.7	33.1	16%
40	48.0	57.4	16%
60	67.6	85.9	21%
80	88.4	107.7	18%
100	108.8	138.4	21%

De seguida testou-se a segunda rede híbrida, sendo esta composta por 9 nós e 16 ligações ($G_p = (9,16)$), tal como apresentado na Figura 51. Um dos objectivos é, mais uma vez, o de verificar qual o comportamento energético deste tipo de rede híbrida, quando o número de nós e ligações aumenta.

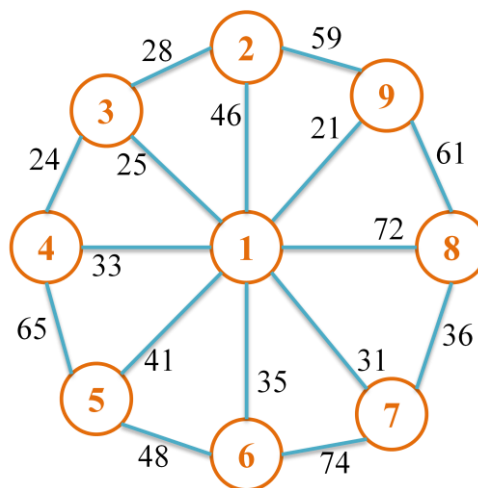


Figura 51 – Rede de teste híbrida com 9 nós e 16 ligações.

Analisando a Figura 52 e a Tabela 14 é possível verificar que o modelo MILP apresenta uma redução do consumo energético, em comparação com o algoritmo de Dijkstra, entre os 22% e os 30%. Já quando comparada com a rede híbrida com 5 nós, o aumento do tráfego exigido também não é traduzido num aumento da eficiência energética. Quando se compara o consumo e eficiência energética da rede em anel e em estrela com a rede híbrida, verifica-se que os valores são bastante semelhantes. Isto deve-se ao facto desta rede, embora com um maior número de ligações entre nós, ser composta pelas duas anteriores.

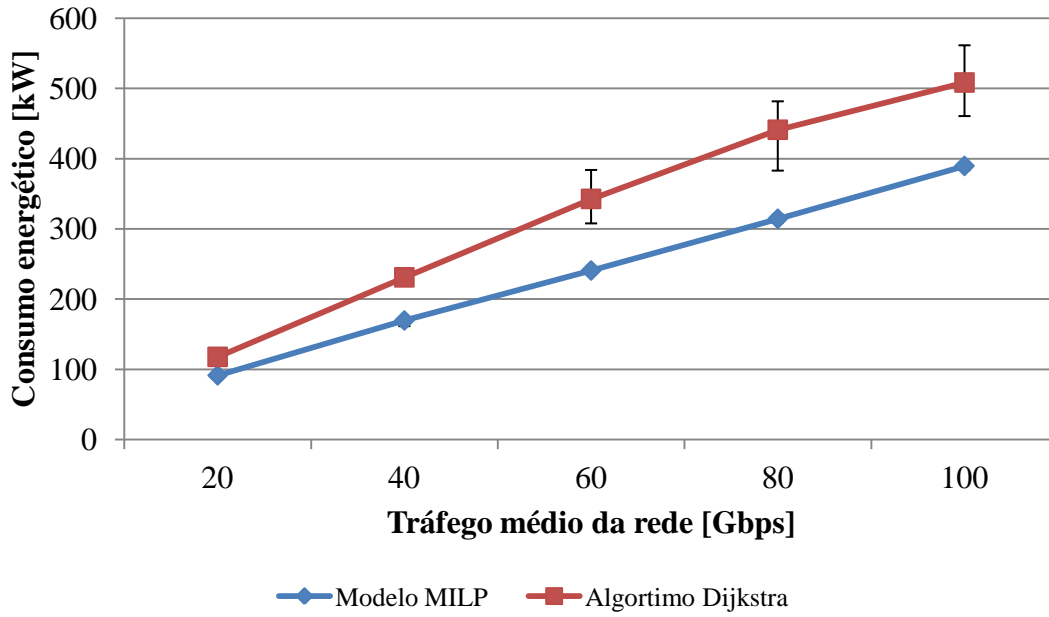


Figura 52 – Consumo energético da rede híbrida com 9 nós e 16 ligações.

Tabela 14 – Valores do consumo energético da rede híbrida com 9 nós e 16 ligações.

Tráfego médio [Gbps]	Modelo MILP [kW]	Algoritmo Dijkstra [kW]	Porcentagem de ganho
20	91.3	117.6	22%
40	169.5	230.9	26%
60	240.7	342.6	30%
80	314.4	441.1	29%
100	389.6	508.4	23%

Topologia em malha

A topologia que se segue neste estudo é a topologia em malha, sendo que a primeira rede testada é composta por 5 nós e 6 ligações ($G_p = (5,6)$), cuja distância entre nós está em km, tal com se encontra na Figura 53.

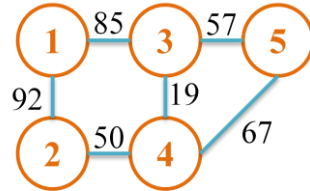


Figura 53 – Rede de teste em malha com 5 nós e 6 ligações.

Na Figura 54 e na Tabela 15 pode observar-se uma redução do consumo energético, quando se usa o modelo MILP, entre os 21% e os 24%. Existe um aumento mínimo da eficiência energética quando o tráfego aumenta. Mais uma vez os valores obtidos para o consumo e eficiência energética são semelhantes ao das restantes redes com 5 nós, pois todas elas são de pequena dimensão.

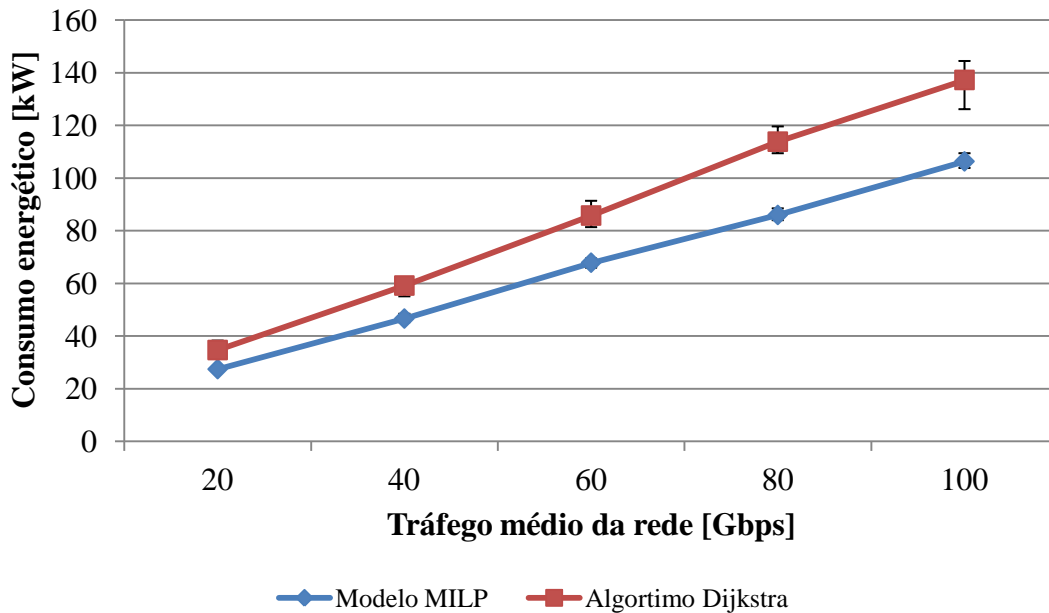


Figura 54 – Consumo energético da rede em malha com 5 nós e 6 ligações.

Tabela 15 – Valores do consumo energético da rede em malha com 5 nós e 6 ligações.

Tráfego médio [Gbps]	Modelo MILP [kW]	Algoritmo Dijkstra [kW]	Porcentagem de ganho
20	27.4	34.6	21%
40	46.6	59.1	21%
60	67.8	85.7	21%
80	85.9	113.8	24%
100	106.3	137.2	23%

Por fim testou-se uma rede em malha com 9 nós e 12 ligações ($G_p = (9,12)$), tal como apresenta a Figura 55.

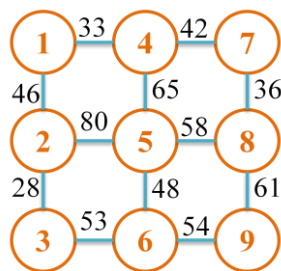


Figura 55 – Rede de teste em malha com 9 nós e 12 ligações.

A análise da Figura 56 e da Tabela 16 permite concluir que a rede em malha, tal como em todas as outras, apresenta uma redução no consumo energético quando se utiliza o modelo MILP em comparação com o de Dijkstra, sendo que essa redução energética está entre os 29% e os 33%. É possível verificar-se que a eficiência do consumo energético aumenta com o tráfego. Com o aumento do número de nós da rede em malha, existe também um aumento da eficiência energética.

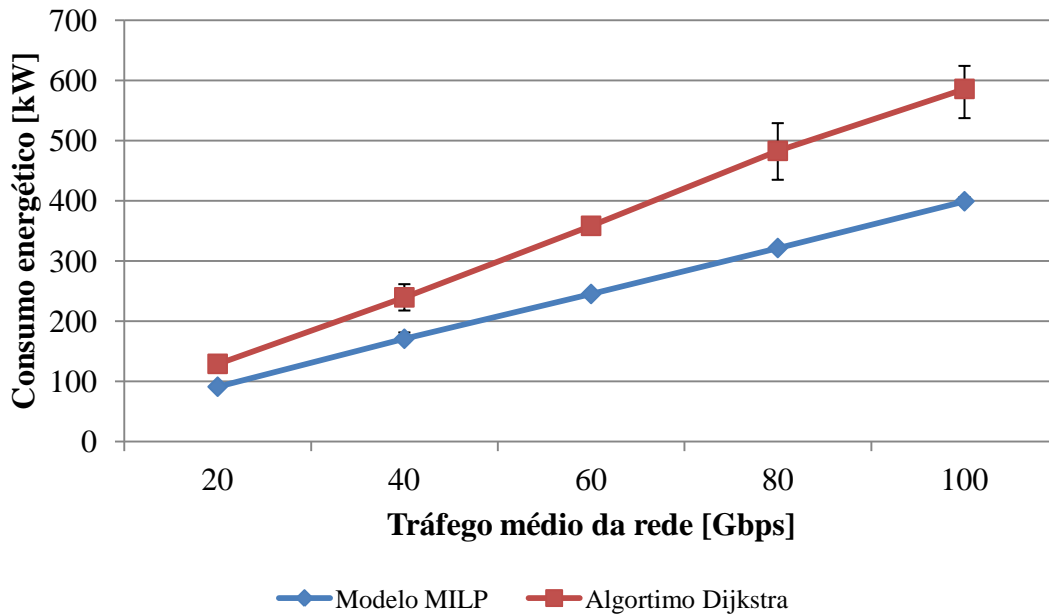


Figura 56 – Consumo energético da rede em malha de 9 nós e 12 ligações.

Tabela 16 – Valores do consumo energético da rede em malha de 9 nós e 12 ligações.

Tráfego médio [Gbps]	Modelo MILP [kW]	Algoritmo Dijkstra [kW]	Porcentagem de ganho
20	91.0	129.0	29%
40	170.7	239.5	29%
60	245.1	358.3	32%
80	321.5	482.9	33%
100	399.1	585.9	32%

Em suma, ao analisar todos os resultados obtidos, é possível verificar que o consumo energético quando é utilizado o modelo MILP, é idêntico para todas as redes, e que há de facto um ganho energético importante relativamente aos algoritmos tradicionais. No geral esta eficiência está compreendida entre os 20% e os 30%. Também foi possível verificar que o aumento do número de nós pode aumentar a eficiência desta, em especial quando esta apresenta maiores alternativas de encaminhamento, como o caso da rede em malha.

Já em relação ao equipamento utilizado, da Tabela 17 à 20, é possível verificar-se o número de equipamento médio que consome energia, em função do tráfego médio exigido para todas as redes de 5 nós. Destas tabelas concluí-se que os equipamentos com mais peso na rede

são as portas dos routers IP, com 95% em média do consumo total do objectivo, o que seria de esperar, visto que o seu consumo energético é muito superior ao dos restantes.

Tabela 17 – Número de equipamento com consumo energético para a rede em anel com 5 nós.

Tráfego médio [Gbps]	Portas de router IP / consumo total [kW]	Amplificadores ópticos IP / consumo total [kW]	Transponders IP / consumo total [kW]
20	26 / 26	24 / 0,2	18 / 1,3
40	44 / 44	24 / 0,2	32 / 2,3
60	63 / 63	24 / 0,2	45 / 3,3
80	82 / 82	24 / 0,2	62 / 4,5
100	103 / 103	24 / 0,2	74 / 5,4

Tabela 18 – Número de equipamento com consumo energético para a rede em estrela com 5 nós.

Tráfego médio [Gbps]	Portas de router IP / consumo total [kW]	Amplificadores ópticos / consumo total [kW]	Transponders / consumo total [kW]
20	26 / 26	22 / 0,2	21 / 1,5
40	45 / 45	22 / 0,2	35 / 2,6
60	64 / 64	22 / 0,2	51 / 3,7
80	84 / 84	22 / 0,2	68 / 5,0
100	102 / 102	22 / 0,2	83 / 6,1

Tabela 19 – Número de equipamento com consumo energético para a rede híbrida com 5 nós.

Tráfego médio [Gbps]	Portas de router IP / consumo total [kW]	Amplificadores ópticos / consumo total [kW]	Transponders / consumo total [kW]
20	27 / 27	28 / 0,2	16 / 1,2
40	46 / 46	34 / 0,3	27 / 2,0
60	65 / 65	36 / 0,3	38 / 2,8
80	83 / 83	37 / 0,3	49 / 3,6
100	103 / 103	37 / 0,3	62 / 4,5

Tabela 20 – Número de equipamento com consumo energético para a rede em malha com 5 nós.

Tráfego médio [Gbps]	Portas de router IP / consumo total [kW]	Amplificadores ópticos / consumo total [kW]	Transponders / consumo total [kW]
20	26 / 26	25 / 0,2	17 / 1,2
40	44 / 44	28 / 0,2	29 / 2,1
60	65 / 65	28 / 0,2	43 / 3,1
80	82 / 82	27 / 0,2	56 / 4,1
100	101 / 101	27 / 0,2	69 / 5,0

Redes NSFNET

A última rede a ser apresentada é a NSFNET, Figura 57, sendo esta uma rede que existe fisicamente, isto é, uma rede real e que é composta por 14 nós e 21 ligações ($G_p = (14,21)$). Esta rede é utilizada para interligar os vários super computadores que se encontram ao longo dos EUA, através de ligações de elevado débito. Esta é uma rede que esteve por detrás da criação e evolução da Internet, tal como a conhecemos hoje. [53]

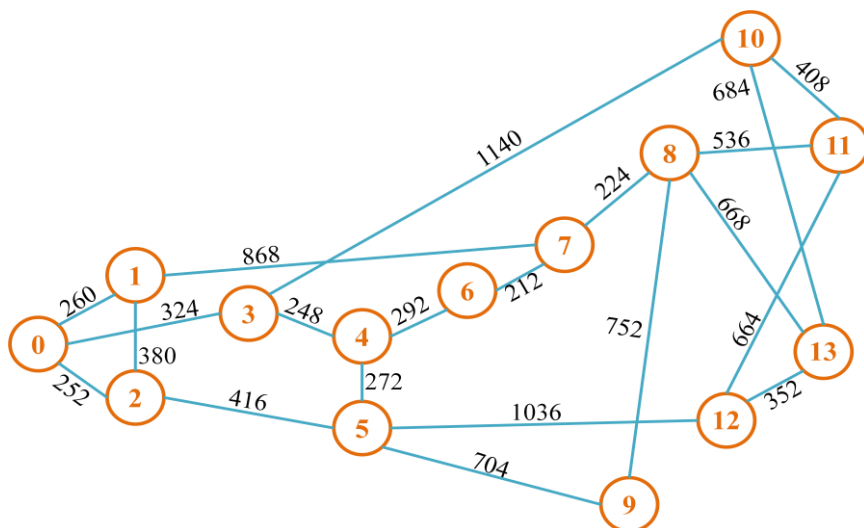


Figura 57 – Rede NSFNET, com as respectivas distâncias entre nós, em km. Baseado em [3].

A observação da Figura 58 e da Tabela 21, permite verificar que o modelo MILP apresenta uma redução do consumo energético em comparação com o algoritmo de Dijkstra entre os 37% e os 41%, valores que são em tudo semelhantes aos apresentados em [3].

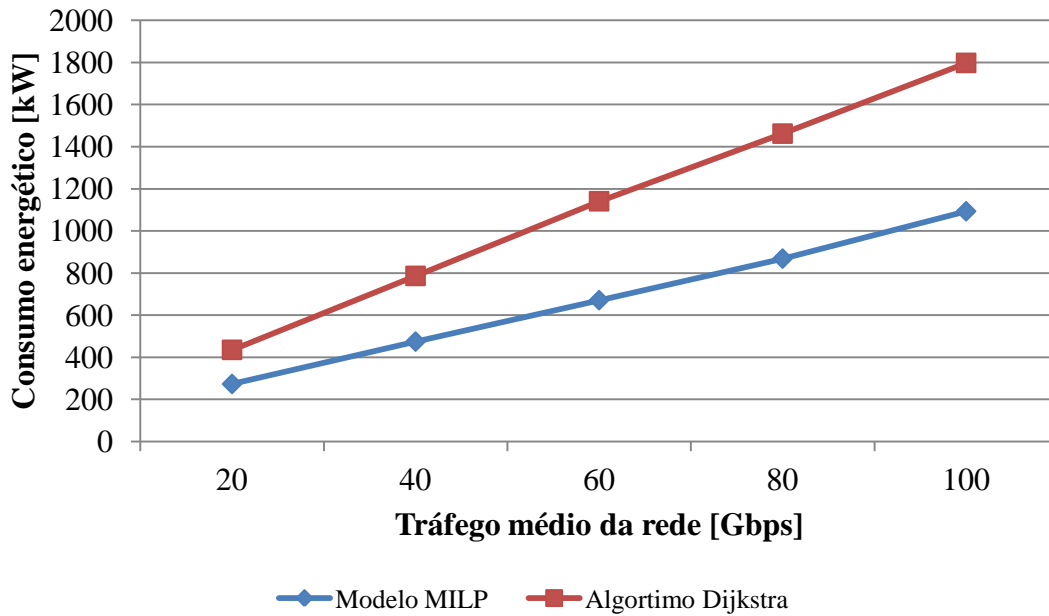


Figura 58 – Consumo energético da rede NSFNET.

Tabela 21 – Valores do consumo energético da rede NSFNET.

Tráfego médio [Gbps]	Modelo MILP [kW]	Algoritmo Dijkstra [kW]	Porcentagem de ganho
20	272.9	434.9	37%
40	474.0	786.0	40%
60	670.8	1140.3	41%
80	868.3	1461.5	41%
100	1092.9	1797.3	39%

Curiosamente, a utilização desta técnica de optimização numa rede real levou a uma redução ainda significativa do consumo energético, relativamente às topologias teóricas. Isto demonstra a utilidade prática desta nas redes ópticas actuais, as quais são em malha e com muitas alternativas de encaminhamento (alternativas essas que são necessárias para garantir robustez da rede em falhas).

Capítulo 5: Conclusões

O aumento do consumo energético por parte das redes de telecomunicações tem-se vindo a acentuar cada vez mais nos últimos anos. Além das óbvias desvantagens ambientais, este aumento tem como consequência o bloqueio do crescimento das redes de telecomunicações. Para fazer frente ao aumento do consumo energético, inúmeros projectos de investigação têm desenvolvido técnicas para tornar as redes de telecomunicação mais eficientes energeticamente.

O objectivo deste trabalho foi o de demonstrar que é possível aumentar a eficiência energética das redes ópticas de telecomunicações através da optimização dos seus recursos, através da utilização de um modelo de optimização MILP, baseado em [3]. Para atingir esse objectivo, o modelo optimiza o encaminhamento na rede em função do consumo energético dos equipamentos existentes e da capacidade dos canais existentes em cada ligação óptica.

Na avaliação do modelo foram testadas 4 topologias teóricas: duas redes em anel, duas redes em estrela, duas redes híbridas, e duas redes em malha. O objectivo de testar as diferentes topologias foi o de identificar, se possível, qual a mais eficiente em termos médios e qual o comportamento destas quando o tráfego exigido aumenta. Ao mesmo tempo foram testadas topologias com dimensões diferentes, de forma analisar a eficiência energética quando o número de nós da rede aumenta.

A Tabela 22 apresenta uma síntese dos resultados obtidos em todas topologias testadas. Observando a tabela, é possível verificar:

1. Uma redução do consumo energético entre os 20% e 30%, entre todos os cenários;
2. O aumento do número de nós na rede, representa em muitos casos um aumento da eficiência energética da rede;

3. As redes com mais ligações por nó apresentam maiores reduções no consumo energético, em especial a rede em malha;
4. Os resultados obtidos com a simulação da rede NSFNET, demonstra que em redes reais podem-se obter valores de eficiência energética ainda superiores aos obtidos com topologias teóricas.

Tabela 22 – Síntese percentual dos ganhos obtidos para todas as topologias.

(Com fundo encarnado é o ganho mínimo obtido na topologia em causa. Com fundo verde é o ganho máximo obtido na topologia em causa.)

Tráfego médio [Gbps]	Anel com 5 nós	Anel com 9 nós	Estrela com 5 nós	Estrela com 9 nós	Híbrida com 5 nós	Híbrida com 9 nós	Malha com 5 nós	Malha com 9 nós	NSFNET
20	23%	23%	18%	23%	16%	22%	21%	29%	37%
40	24%	30%	21%	19%	16%	26%	21%	29%	40%
60	29%	26%	17%	27%	21%	30%	21%	32%	41%
80	24%	26%	10%	27%	18%	29%	24%	33%	41%
100	27%	24%	24%	30%	21%	23%	23%	32%	39%
Média	26%	26%	18%	25%	18%	26%	22%	31%	40%

Trabalho futuro

Esta dissertação esteve focada em otimizar o consumo energético de redes IP sobre WDM, através da aplicação de um modelo MILP. No entanto, devido ao grau de complexidade computacional destes modelos, devem também ser estudados modelos heurísticos que também consigam otimizar o consumo energético destas redes. Para além do estudo da eficiência energética, é necessário saber até que ponto é que estas redes podem ou não, comprometer a qualidade de serviço das redes, especialmente devido ao crescente número de serviços interactivos e que funcionam em tempo real. Outro estudo que pode ter interesse, é a introdução de fontes de energia renováveis que alimentem os diferentes componentes das redes, através de modelos que maximizem a utilização destas fontes.

Referências

- [1] – Christoph Lange, Dirk Kosiankowski, Christoph Gerlach, Fritz-Joachim Westphal, Andreas Gladisch, “*Energy Consumption of Telecommunication Networks*”, *European Conference on Optical Communications (ECOC’09)*, Viena, Áustria, 20 a 24 Setembro de 2009.
- [2] – C. Lange and A. Gladisch, “*Energy consumption of telecommunication networks - a network operator’s view*”, *OFC/NFOEC’09, Workshop on Energy Footprint of ICT: Forecast and Network Solutions*, San Diego, CA, Março 2009.
- [3] – G. Shen and R. S. Tucker, “*Energy-Minimized design for IP over WDM Networks*”, *Optical Communication and Networking*, volume 1, p. 176-186, Junho de 2009.
- [4] – M. Gupta and S. Singh, “*Greening of the Internet*”, *Proc.ACM SIGCOMM*, Agosto de 2003.
- [5] – Yi Zhan, Pulak Chowdhury, Massimo Tornatore and Biswanath Mukherjee, “*Energy Efficiency in Telecom Optical Networks*”, *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, volume 12, p. 441 – 458, 2010.
- [6] – “*ITU symposia on ICTs and climate change*”,
<http://www.itu.int/ITU-T/worksem/climatechange/index.html>, 2009.
- [7] – “*IEEE P802.3az energy efficient Ethernet task force*”,
<http://www.ieee802.org/3/az/index.html>, 2009.
- [8] – B. Dugerdil, “*ETSI green agenda*”,
http://www.itu.int/dms_pub/itu-t/oth/06/0F/T060F0000090032PDFE.pdf, 2009.
- [9] – “*EIATRACK*” <http://www.eiatrack.org/>.

- [10] – F. Idzikowski, S. Orłowski, C. Raack, H. Woesner, and A. Wolisz, “Saving energy in IP-over-WDM networks by switching off line cards in low-demand scenarios”, *Conference on Optical Network Design and Modeling (ONDM’10)*, Quioto, Japão, Fevereiro de 2010.
- [11] – J. Mandin, “EPON powersaving via sleep mode”, IEEE P802.3av10GEPON Task Force Meeting, www.ieee802.org/3/av/public/2008-09/3av_0809_mandin_4.pdf, Setembro de 2008.
- [12] – R. Kubo, J. Kani, Y. Fujimoto, N. Yoshimoto, and K. Kumozaki, “Sleep and adaptive link rate control for power saving in 10G-EPON systems?”, *IEEE GLOBECOM’09*, Honolulu, Havaí, Dezembro 2009.
- [13] – H. Yuanling and M. Hajduczenia, “Adjustable timer value for power saving”, IEEE P802.3av 10GEPON Task Force Meeting, [www.ieee802.org/3/av/public/2008-09/3av_0809_hajduczenia power Saving.pdf](http://www.ieee802.org/3/av/public/2008-09/3av_0809_hajduczenia_power Saving.pdf), Setembro de 2008.
- [14] – GPON Power Conservation, “ITU-T G-Series Recommendations - Supplement 45 (G.sup45)”, Maio de 2009.
- [15] – S.-W. Wong, L. Valcarenghi, S.-H. Yen, D. R. Campelo, S. Yamashita, and L. G. Kazovsky, “Sleep mode for energy saving PONs: Advantages and drawbacks”, *IEEE GLOBECOM Workshops’09*, Honolulu, Havaí, pp. 1–6, Dezembro de 2009.
- [16] – S.-W. Wong, S.-H. Yen, P. Afshar, S. Yamashita, and L. G. Kazovsky, “Demonstration of energy conserving TDM-PON with sleep mode ONU using fast clock recovery circuit”, *OFC/NFOEC’10*, San Diego, CA, Março de 2010.
- [17] – H. Song, “Long-Reach Passive Optical Networks”, PhD Dissertation, University of California, Davis, 2009.
- [18] – L. Shi, S. S. Lee, and B. Mukherjee, “Energy-efficient long-reach passive optical network: A dynamic wavelength allocation scheme”, *Photonics in Switching’10*, Monterey, CA, Julho de 2010.
- [19] – K. Zhu and B. Mukherjee, “Traffic grooming in optical WDM mesh networks,” *IEEE J. Sel. Areas Communications*, volume 20, no. 1, pp. 122–133, Janeiro de 2002.
- [20] – O. Gerstel, P. Lin, and G. Sasaki, “Combined WDM and SONET network design”, in *Proc. INFOCOM’98*, volume 2, San Francisco, CA, pp. 734 – 743, Março de 1998.

- [21] – A. L. Chiu and E. H. Modiano, “*Traffic grooming algorithms for reducing electronic multiplexing costs in WDM ring networks*”, *J. Lightwave Technol.*, volume 18, pp. 2 – 12, Janeiro de 2000.
- [22] – J. Wang, V. R. Vemuri, W. Cho, and B. Mukherjee, “*Improved approaches for cost-effective traffic grooming in WDM ring networks: ILP formulations and single-hop and multihop connections*” *IEEE/OSA J. Lightwave Technol.*, volume 19, pp. 1645 – 1653, Novembro de 2001.
- [23] – P. J. Wan, L. Liu, and O. Frieder, “*Grooming of arbitrary traffic in SONET/WDM BLSRs*” *Proc. IEEE GLOBECOM’99*, pp. 1012 – 1016, Novembro de 1999.
- [24] – P. J. Wan, G. Calinescu, and O. Frieder, “*Grooming of arbitrary traffic in SONET/WDM BLSRs*,” *IEEE J. Select. Areas Commun.*, volume 18, pp. 1995 – 2003, Outubro de 2000.
- [25] – J. Chabarek, J. Sommers, P. Barford, C. Estan, D. Tsang, S. Wright, “*Power awareness in network design and routing*,” *IEEE INFOCOM’08*, Phoenix, AZ, pp. 1130 – 1138, 2008.
- [26] – B. St. Arnaud, “*CANARIE: Research networks to help reduce global warming*”, *OFC/NFOEC’09, Workshop on Energy Footprint of ICT: Forecast and Network Solutions*, San Diego, CA, Mar. 2009.
- [27] – A. Cianfrani, V. Eramo, M. Listanti, M. Marazza, E. Vittorini, “*An energy saving routing algorithm for a green OSPF protocol*” *IEEE INFOCOM’10, Traffic Management and Monitoring Workshop*, San Diego, CA, Março 2010.
- [28] – Xiaowen Dong, Taisir El-Gorashi, Jaafar M. H. Elmirghani, “*IP Over WDM Networks Employing Renewable Energy Sources*”, School of Electronic and Electrical Engineering, University of Leeds, LS2 9JT, United Kingdom, 2010
- [29] – Kevin H. Liu, “*IP over WDM*”, John Wiley & Sons LTD, 2002.
- [30] – G. Keiser, “*Optical Communications Essentials*”, McGraw-Hill Professional, 2003.
- [31] – Wikipedia EN, “*IPv4*”, <http://en.wikipedia.org/wiki/IPv4>, visualizado a 1/12/2011.
- [32] – Cisco Systems, “*IPv6 Extension Headers Review and Considerations*”, Outubro de 2006.
- [33] – Wikipedia EN, “*IPv6 packet*”, http://en.wikipedia.org/wiki/IPv6_packet, visualizado a 1/12/2011.

- [34] – Cisco *Configuring Priority Queueing*,
http://www.cisco.com/en/US/docs/ios/12_0/qos/configuration/guide/qcpq.html, visualizado a 1/12/2011.
- [35] – Cisco *Congestion Management Overview*,
http://www.cisco.com/en/US/docs/ios/12_0/qos/configuration/guide/qcconman.html#wp9118,
visualizado a 1/12/2011.
- [36] – J. F. Kurose, K. W. Ross, “*Computer Networking: A Top Down Approach*”, 4^o edição, Addison-Wesley, 2007
- [37] – C. Huitema, “*Routing in the Internet*”, 2^a Edição, Prentice Hall, 2000.
- [38] – J. Moy, “*OSPF Version 2*”, RFC 2328, Abril de 1998.
- [39] – D. Oran, “*OSI IS-IS Intra-domain Routing Protocol*”, RFC 1142, Fevereiro de 1990.
- [40] – Y. Rekhter and T. Li, “*A Border Gateway Protocol 4 (BGP-4)*”, RFC 1771, Março de 1995.
- [41] – “*Attenuation*”, *Electrical Engineering Training Series*,
<http://www.tpub.com/neets/tm/106-14.htm>, visualizado a 1/12/2011.
- [42] – Jan Iamperski, “*Fundamentals of Optical Fiber Technology and Systems – Fiber loss mechanisms*”, *Poznan University of Technology, Institute of Electronics & telecommunications*,
http://www.invocom.et.put.poznan.pl/~invocom/C/P1-9/swiatlowody_en/p1-1_2_2.htm,
visualizado a 1/12/2011.
- [43] – Rajiv Ramaswami, Kumar N. Sivarajan, Galen H. Sasaki, “*Optical Networks – A Practical Perspective*” 3rd Edition.
- [44] – John M. Senior, “*Optical Fiber Communications – Principles and Practice*”, 3^a Edição, Prentice Hall, 2009
- [45] – B. Mukherjee, “*Optical Communication Networks*”, Nova Iorque, McGraw-Hill, 1997.
- [46] – R. Ramaswami and K. N. Sivarajan, “*Design of logical topologies for wavelength-routed optical networks*”, *IEEE J. Sel. Areas Communications*, volume 14, número 5, p.840-851, Junho de 1996.

- [47] – B. V. Caenegem, W. V. Parys, F. F. Turck, P. M. Demeester, “*Dimensioning of survivable WDM networks*”, *IEEE J. Sel. Areas Communications*, volume 16, numero 7, p 1146-1157, Setembro de 1998.
- [48] – Lars Vogel, “*Dijkstra's Shortest Path Algorithm in Java*”, <http://www.vogella.de/articles/JavaAlgorithmsDijkstra/article.html#links>, 2 de Dezembro de 2009, visualizado a 1/12/2011.
- [49] – Cisco CRS-1 specification data sheet, <http://www.cisco.com>.
- [52] – Alcatel-Lucent WaveStar OLS 1.8T product specification, <http://www.alcatel-lucent.com>.
- [52] – Cisco ONS 15501 Erbium Doped Fiber Amplifier data sheet, <http://www.cisco.com>.
- [53] – *National Science Foundation*, “*The Launch of NSFNET*”, <http://www.nsf.gov/about/history/nsf0050/internet/launch.htm>, visualizado a 1/12/2011.