

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS

GABRIEL PASCHOAL STEIN

Aplicação da técnica de Processo Analítico Hierárquico
(AHP) na determinação de estratégias para redução do
consumo energético das redes ópticas

São Carlos
2015

GABRIEL PASCHOAL STEIN

Aplicação da técnica de Processo Analítico Hierárquico (AHP) na determinação de estratégias para redução do consumo energético das redes ópticas

Trabalho de Conclusão de curso apresentado
à Escola de Engenharia de São Carlos, da
Universidade de São Paulo

Curso de Engenharia Elétrica com
ênfase em Eletrônica

ORIENTADORA: Mônica Lacerda Rocha

São Carlos

2015

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO,
POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS
DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

S819a Stein, Gabriel Paschoal
Aplicação da técnica de Processo Analítico
Hierárquico (AHP) na determinação de estratégias para
redução do consumo energético das redes ópticas /
Gabriel Paschoal Stein; orientadora Mônica Lacerda
Rocha. São Carlos, 2015.

Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica com
ênfase em Eletrônica) -- Escola de Engenharia de São
Carlos da Universidade de São Paulo, 2015.

1. rede óptica. 2. eficiência energética. 3. AHP.
4. TIC. I. Título.

FOLHA DE APROVAÇÃO

Nome: Gabriel Paschoal Stein

Título: “Aplicação da técnica de Processo Analítico Hierárquico (AHP) na determinação de estratégias para redução do consumo energético das redes ópticas”

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado
em 22/06/2015,

com NOTA 9,5 (nove, cinco), pela Comissão Julgadora:

Profa. Dra. Mônica de Lacerda Rocha - (Orientadora - SEL/EESC/USP)

Prof. Titular Amílcar Careli César - (SEL/EESC/USP)

Prof. Dr. Leonardo André Ambrosio - (SEL/EESC/USP)

Coordenador da CoC-Engenharia Elétrica - EESC/USP:
Prof. Associado Homero Schiabel

Dedicatória

A minhas avós pelos incentivos que elas sempre me derem.

Agradecimentos

Agradeço a minha orientadora Profa. Dra. Mônica Lacerda Rocha por todo apoio e compressão dados, revisões e acompanhamento desse estudo.

Agradeço a minha família por me apoiarem nos momentos difíceis.

Resumo

A expansão dos serviços de telecomunicações tem elevado o consumo de energia o que, em consequência, aumenta as emissões de gases pelo efeito estufa, nocivo ao meio ambiente. Além disso, o custo da energia elétrica aumenta, pois as fontes tradicionais de energia não são renováveis e sua exploração tem se tornado mais complexa. Neste cenário, o esforço para se reduzir o consumo de energia nas redes de telecomunicações vem ganhando interesse. A área de Tecnologia de Informação e Comunicação (TIC) é promissora para implantação de medidas que visem melhorar a eficiência energética. Num contexto de modernização tecnológica crescente, vários estudos recentes vêm focalizando a redução do consumo energético das redes de comunicação. Neste cenário, as redes ópticas representam um campo de crescente importância para as TICs, pois são fundamentais para garantir as altas taxas e o longo alcance de transmissão que a sociedade moderna demanda.

Neste trabalho apresenta-se uma revisão de diversos métodos para a redução de consumo energético em redes ópticas, bem como dos conceitos básicos ligados a uma ferramenta que pode ser usada como suporte ao planejamento das mesmas, conhecida como Processo Analítico Hierárquico (*Analytic Hierarchy Process*, AHP). A técnica AHP permite a tomada de decisões de forma organizada e lógica e pode, portanto, ser aplicada a um estudo no qual o objetivo é escolher a melhor estratégia de economia de energia entre cinco alternativas propostas para uma rede óptica do tipo WDM (*wavelength division multiplexing*) com operação em “modo suspenso” (ou *stand by*).

Palavras-chave: rede óptica, eficiência energética, AHP, TIC

Abstract

The expansion of the telecommunication services has increased the overall energy consumption; consequently, there is a rise in the Greenhouse Gas (GHG) emissions, which is harmful to the environment. Electrical energy is getting more expensive, since traditional energy sources are normally non-renewable and thus are getting harder to be obtained. Because of these two factors efforts in consumption reduction in telecom networks is an area of growing interest. Information and Communication Technologies (ICT) is a promising area to implement energy efficiency measures. Optic communication is a technology of growing importance in de ICT networks, due to its high transmission rates and long reach. Therefore, many studies focus in power reduction for optical networks.

In this work a study of various methods for energy consumption reduction in optical networks is performed. It is also studied the decision tool known as Analytic Hierarchy Process (AHP), which allow decision making to be applied in an organized and logic way. The AHP technic is then exemplified in a case study, where the objective is to choose the best energy saving strategy for an optical WDM network with sleep mode, between five different alternatives.

Keywords: optical network, energy efficiency, AHP, ICT

Sumário

1. Introdução.....	1
2. Analytic Hierachy Process	3
2.1. Um exemplo de decisão.	4
3 Redes Ópticas de Telecomunicações	7
3.1 Eficiência energética em redes ópticas de telecomunicações	7
3.1.1 Redes Núcleo	8
3.1.2 Redes Metropolitanas	9
3.1.3 Redes de Acesso.....	10
3.2 Perspectiva histórica de consumo energético.....	11
3.3 Perspectiva futura	12
3.4 Redes <i>Wavelength Division Multiplexing</i>	13
3.5 Tecnologias e estratégias para redução de consumo.....	13
4 Aplicação da Técnica a um Caso.....	22
4.1 Introdução ao Caso	22
4.2 Aplicação da técnica	23
4.3 Análise dos resultados	26
5 Conclusão.....	28
Anexo A.....	29
Referencias	31

Lista de Figuras

FIGURA 1 MODELO HIERÁRQUICO PARA AVALIAÇÃO DE DECISÕES.....	5
FIGURA 2 HIERARQUIA DE REDES DE TELECOMUNICAÇÕES [4].	7
FIGURA 3 IP OVER WDM [4]	9
FIGURA 4 REDES METROPOLITANAS E DE ACESSO [4].	11
FIGURA 5 ENERGIA POR BIT POR 100KM DE TRANSMISSÃO [13]	12
FIGURA 6 CRESCIMENTO DO CONSUMO ENERGÉTICO EM REDES DE TELECOMUNICAÇÕES [16].	13
FIGURA 7 REDES PARALELAS NA MESMA INFRAESTRUTURA [4].....	15
FIGURA 8 ROTEAMENTO VERDE COM A DISPONIBILIDADE DE ENERGIA RENOVÁVEL [5].....	16
FIGURA 9 COMPARAÇÃO ENTRE ÉTHERNET E UMA SOLUÇÃO TODA ÓPTICA [7].....	17
FIGURA 10 ESTADOS DE ENERGIA DE EQUIPAMENTOS DE REDE [7].	19
FIGURA 11 POTÊNCIA TOTAL CONSUMIDA NAS REDES A) COST239 B) USNET C) IPÊ [9].	23
FIGURA 12 PROBABILIDADE DE BLOQUEIO PARA AS REDES A) COST239 B) USNET C) IPÊ [9].	23
FIGURA 13 HIERARQUIA DA AHP APLICADA PARA ESCOLHA DE UMA ESTRATÉGIA DE ECONOMIA DE ENERGIA	24
FIGURA 14 COMPARAÇÃO ENTRE AS ALTERNATIVAS PARA UMA DECISÃO COM PRIORIDADE NA QUALIDADE DE SERVIÇO.....	27
FIGURA 15 COMPARAÇÃO ENTRE AS ALTERNATIVAS PARA UMA DECISÃO COM PRIORIDADE NA ECONOMIA DE ENERGIA.....	27

Lista de Tabelas

TABELA 1 ESCALA FUNDAMENTAL EM NÚMEROS ABSOLUTOS [6].	4
TABELA 2 COMPARAÇÃO DOS CRITÉRIOS COM RESPEITO AO OBJETIVO.	5
TABELA 3 COMPARAÇÃO DOS SUBCRITÉRIOS EM RELAÇÃO AO CRITÉRIO 1.	5
TABELA 4 COMPARAÇÃO DAS ALTERNATIVAS EM RELAÇÃO AO CRITÉRIO 2.	5
TABELA 5 COMPARAÇÃO FINAL.	ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO.
TABELA 6 CONSUMO DE ENERGIA EM DIFERENTES COMPONENTES DE REDES DE TELECOMUNICAÇÃO [4].	9
TABELA 7 AVALIAÇÃO DE POTÊNCIA [7].	17
TABELA 8 MATRIZ DE COMPARAÇÃO DOS CRITÉRIOS PARA ESCOLHA DE UMA ARQUITETURA.	24
TABELA 9 MATRIZ DE COMPARAÇÃO ENTRE AS ALTERNATIVAS E O CRITÉRIO ECONOMIA DE ENERGIA PARA A REDE COST239.	24
TABELA 10 MATRIZ DE COMPARAÇÃO ENTRE AS ALTERNATIVAS E O CRITÉRIO PROBABILIDADE DE BLOQUEIO PARA A REDE COST239.	24
TABELA 11 MATRIZ DE COMPARAÇÃO ENTRE AS ALTERNATIVAS E O CRITÉRIO ECONOMIA DE ENERGIA PARA A REDE USNET.	25
TABELA 12 MATRIZ DE COMPARAÇÃO ENTRE AS ALTERNATIVAS E O CRITÉRIO PROBABILIDADE DE BLOQUEIO PARA A REDE USNET.	25
TABELA 13 MATRIZ DE COMPARAÇÃO ENTRE AS ALTERNATIVAS E O CRITÉRIO ECONOMIA DE ENERGIA PARA A REDE IPÊ.	25
TABELA 14 MATRIZ DE COMPARAÇÃO ENTRE AS ALTERNATIVAS E O CRITÉRIO PROBABILIDADE DE BLOQUEIO PARA A REDE IPÊ.	25
TABELA 15 RANKING DE PRIORIDADES DAS ALTERNATIVAS.	26
TABELA 16 MATRIZ DE COMPARAÇÃO DOS CRITÉRIOS PARA ESCOLHA DE UMA ARQUITETURA PRIORIZANDO A ECONOMIA DE ENERGIA.	26
TABELA 17 RANKING DE PRIORIDADES DAS ALTERNATIVAS PRIORIZANDO A ECONOMIA DE ENERGIA.	26

1. Introdução

A crise energética e a crescente preocupação com o aquecimento global têm estimulado a busca de possíveis soluções para esses problemas em diversas áreas da ciência. Atualmente a maior parte da energia provida é gerada pelas fontes tradicionais de energia, que usualmente são combustíveis fósseis: óleo, carvão, gás e nuclear [1]. Estas são fontes de energia que eventualmente irão se esgotar ou eventualmente sua extração será muito cara para ser lucrativa. Essas mesmas fontes são também nocivas para o meio ambiente e contribuem para a mudança climática devido à grande quantidade de gases do efeito estufa que liberam [2].

Existem várias direções a serem exploradas para buscar uma solução para essa situação. Uma delas é a substituição das fontes tradicionais de energia por fontes renováveis, que reduzem a emissão de poluentes e são inesgotáveis, porém atualmente são mais caras que as fontes tradicionais. Uma outra direção é a pesquisa e desenvolvimento de métodos de redução do consumo energético em diversas áreas científicas e tecnológicas, dessa forma reduzindo a energia necessária para sustentar as atividades humanas [3].

Tecnologia de informação e comunicação (TIC) é usada em diversos aspectos da nossa sociedade, trabalho a distância, comércio eletrônico, videoconferências, etc. Devido a essas atividades, que reduzem o impacto humano no meio ambiente devido a redução da necessidade do ser humano se locomover para transmitir dados, TIC tem uma imagem amigável ao meio ambiente. Com desenvolvimentos contínuos, TIC é uma tecnologia cada vez mais acessível e cada vez mais presente nas atividades cotidianas, provocando um incremento nos equipamentos e dispositivos de TIC, que por sua vez reflete em um aumento no consumo de energia. Atualmente, TIC é responsável por 8% do consumo global de energia [4] e é também responsável por 2% - 2,5% das emissões globais de gases do efeito estufa [5].

Visando resolver ou minimizar esses problemas diversas soluções vêm sendo propostas, e escolher a melhor não é uma tarefa simples. Para tomar uma decisão é preciso conhecer o problema, a necessidade e objetivo da decisão, os critérios e subcritérios da decisão, grupos afetados e as alternativas de ações a serem tomadas. Só então pode ser determinada a alternativa mais adequada ao cenário considerado ou, no caso da alocação de recursos, as prioridades das alternativas. A tomada de decisões envolve critérios e subcritérios usados para classificar as alternativas das decisões, onde esses critérios podem ser intangíveis. Devido à complexidade desse tipo de decisão é recomendável que se use uma ferramenta que permita a tomada de decisões de forma organizada, como a técnica *Analytic Hierachy Process* (AHP) [6].

Para ilustrar a aplicação da técnica AHP, neste trabalho foi realizado um estudo das redes ópticas, suas características, suas perspectivas históricas e futuras e, dentro deste cenário evolutivo, o consumo crescente de energia dos equipamentos das redes pode torná-las inviáveis. Assim, é feita uma revisão de estudos realizados em [4], [5], [7], [8], onde são propostas soluções para os problemas relacionados ao consumo de energia de redes ópticas abrangendo soluções em duas direções: utilização de uma fonte de energia renovável e redução no consumo.

Visto que a tomada de decisões sobre o planejamento envolvendo redes ópticas é uma tarefa complexa foi estudada a técnica AHP, visando facilitar e organizar a tomada de decisões do planejamento. A ferramenta AHP foi, então, implementada em MatLab o que permitiu a aplicação da técnica a um estudo de caso baseado no trabalho de Nereida C. L. Valdivia [9] visando a escolha da melhor estratégia para operação em modo suspenso de redes ópticas WDM (*wavelength division multiplexing*).

A divisão do trabalho é a seguinte:

Capítulo 2: a técnica AHP é apresentada e exemplificada.

Capítulo 3: é introduzida a estrutura de redes ópticas de telecomunicações e soluções para o problema energético. Também são exibidos alguns dados históricos e previsões futuras.

Capítulo 4: a técnica AHP é aplicada a um estudo de caso e são apresentados os resultados dessa aplicação.

Capítulo 5: apresenta a conclusão do trabalho.

2. Analytic Hierachy Process

A AHP é uma ferramenta criada na década de 1970 por Thomas L. Saaty e vem sendo estudada e aprimorada desde então. Ela é a uma técnica estruturada para organizar e analisar decisões complexas, baseada em princípios de matemática e psicologia. Essa técnica é usada ao redor do mundo em diversas situações de decisão, campos como: negócios, indústria, educação, saúde e governo [10].

Para a utilização da AHP primeiramente é decomposto o problema de decisão em uma hierarquia mais simples de subproblemas, cada uma das quais pode ser analisada individualmente. Os elementos da hierarquia podem ser relacionados com qualquer aspecto da decisão, fatores tangíveis ou intangíveis, meticulosamente calculados ou estimados aproximadamente, bem ou mal entendidos, tudo que se aplique à decisão em questão. Uma vez que a hierarquia foi construída, seus vários elementos são comparados, dois de cada vez, com respeito ao impacto no elemento diretamente acima deles na hierarquia. Ao fazer comparações podem ser usados dados concretos sobre os elementos, bem como a opinião sobre a tomada de decisão. É a base da AHP que a capacidade crítica humana pode ser usada e em conjunto à informação concreta [11].

Essas avaliações são convertidas pela AHP para valores numéricos que podem ser processados e comparados por todo o problema. É derivado de cada elemento da hierarquia um peso numérico ou uma prioridade, permitindo a comparação de diversos elementos de forma consistente e racional. A última etapa é o cálculo das prioridades numéricas para cada uma das alternativas de decisão, que representam a capacidade relativa da decisão de atingir o objetivo, permitindo um planejamento de várias linhas de ação [11].

O processo da técnica AHP pode ser resumido nos seguintes passos [19]:

1. Definir o problema e determinar o tipo de conhecimento procurado
2. Estruturar a hierarquia de decisão a partir do topo com o objetivo de decisão, então os objetivos de uma perspectiva ampla, através de níveis intermediários (critérios nos quais os elementos subsequentes dependem) até o nível mais baixo (normalmente um conjunto de alternativas).
3. Construir um conjunto de matrizes de comparação de pares. Cada elemento em um nível superior é usado para comparar os elementos no nível imediatamente inferior.
4. Usar a prioridade obtida através das comparações para ponderar as prioridades no nível imediatamente abaixo. Fazer isso para todo elemento. Então para cada elemento no nível abaixo adicionar seu valor ponderado e obter uma prioridade geral ou global. Continuar o processo de ponderação e adição até que a prioridade final das alternativas no nível mais baixo seja obtida.

Para fazer as comparações, é necessária uma escala de números que indique quão mais importante um elemento é do que outro com respeito ao critério ou propriedade a ser comparada. Essa escala é encontrada na tabela 1 [6]. Após serem feitas as comparações é montada uma matriz de comparação $n \times n$, matriz MC vista na equação (1). Os valores da matriz MC são determinados pela tabela [6] através da comparação da importância dos

elementos da matriz. O valor de $MC(1,1)$ é resultado da comparação do primeiro elemento com ele mesmo, logo o valor 1. Para $MC(1,2)$ é feita a comparação do primeiro elemento com o segundo, resultando em MC_{12} . Reciprocamente a comparação do segundo elemento com o primeiro resulta no valor $1/MC_{12}$. Esse processo é repetido até que a matriz esteja toda preenchida.

$$MC = \begin{pmatrix} 1 & MC_{12} & \dots & MC_{1n} \\ 1/MC_{12} & 1 & \dots & MC_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1/MC_{1n} & 1/MC_{2n} & \dots & 1 \end{pmatrix} \quad (1)$$

Após montada a matriz MC é calculado o autovalor máximo e calculado seu autovetor correspondente. Esse autovetor é então normalizado, para que a soma resultante de seus elementos seja igual a 1. Esse vetor normalizado será o peso ou a prioridade dos elementos comparados nessa matriz.

Tabela 1 Escala fundamental em números absolutos [6].

Intensidade de Importância	Definição	Explicação
1	Igual Importância	Duas atividades contribuem igualmente para o objetivo
2	Importância fraca	
3	Importância moderada	Experiência e julgamento favorece levemente uma sobre a outra
4	Moderada avançada	
5	Importância forte	Experiência e julgamento favorece fortemente uma sobre a outra
6	Forte avançada	
7	Importância muito forte	Experiência e julgamento favorece muito fortemente uma sobre a outra, dominância demonstrada na prática
8	Muito, muito forte	
9	Importância extrema	A evidência favorecendo uma sobre a outro é da maior ordem de afirmação possível.
Recíproca dos números acima	Se a atividade i tem um dos valores acima atribuída a ela quando comparada com a atividade j , então j tem o valor recíproco quando comparado com i	

Para facilitar o uso da técnica foi criado um programa em MATLAB que calcula as prioridades de problema, usando as alternativas, critérios, subcritérios e as matrizes de comparação entradas pelo usuário. O código dele pode ser encontrado no anexo A. A validação do programa foi feita através da comparação dos resultados dos programa em MATLAB com os resultados de uma ferramenta online [12], que calcula as prioridades de um sistema AHP [12].

2.1. Um exemplo de decisão.

Para exemplificar o uso da técnica AHP, será usado o modelo hierárquico abstrato da figura 1, que possui três níveis, o primeiro sendo o objetivo, o segundo os critérios e terceiro os subcritérios. Avaliando os critérios e subcritérios será definido qual a melhor alternativa

para o objetivo desejado. Para um problema mais complexo, mais critérios e subcritérios podem ser adicionados ou até mesmo mais níveis, gerando subcritérios dos subcritérios.

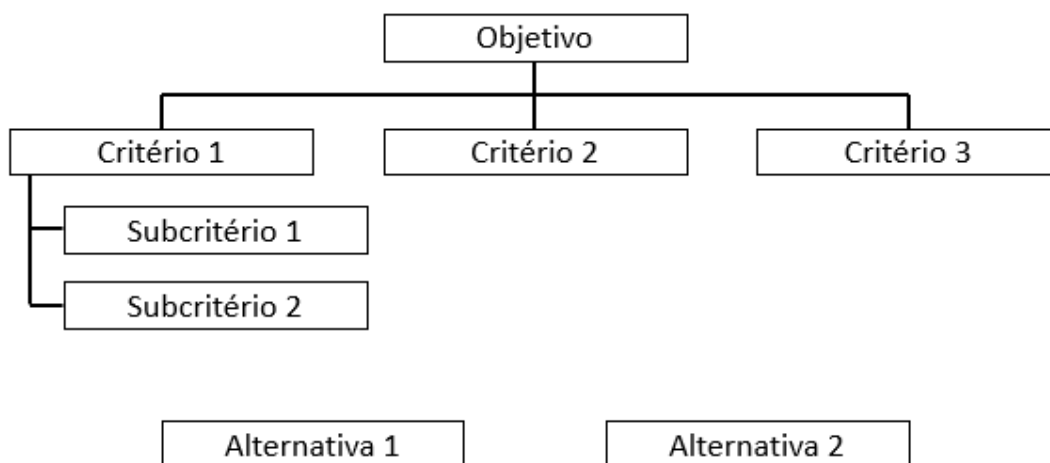


Figura 1 Modelo hierárquico para avaliação de decisões

Nesse cenário haverá seis matrizes de comparação, uma para os critérios em relação ao objetivo, vista na tabela 2, uma para os subcritérios, tabela 3, e quatro para as 2 alternativas em relação a todos critérios e subcritérios, uma delas sendo exemplificada na tabela 4. Os valores das tabelas são obtidos com o uso da tabela 1, cada elemento é comparado com todos os elementos e dependendo a importância de um sobre o outro é atribuído um valor a essa comparação, por exemplo o critério 1 é de importância moderada sobre o critério 2 logo é atribuído o valor 3 a essa comparação e o valor 1/3 a comparação inversa. Após serem feitas todas as comparações é então calculada as prioridades, calcula-se primeiro o autovetor máximo e a partir dele calcula-se o autovetor correspondente, esse autovetor é então normalizado e resulta no vetor de prioridades.

Tabela 2 Comparação dos critérios com respeito ao objetivo.

Objetivo	Critério 1	Critério 2	Critério 3	Prioridades
Critério 1	1	3	2	0,5077
Critério 2	1/3	1	1/5	0,1132
Critério 3	1/2	5	1	0,3791

Tabela 3 Comparação dos subcritérios em relação ao critério 1.

Critério 1	Subcritério 1	Subcritério 2	Prioridades
Subcritério 1	1	7	0,8750
Subcritério 2	1/7	1	0,1250

Tabela 4 Comparação das alternativas em relação ao critério 2.

Critério 2	Alternativa 1	Subcritério 2	Prioridades
Alternativa 1	1	1/3	0,2500
Alternativa 2	3	1	0,7500

O valor da prioridade geral é o resultado da somatória do produto do peso da alternativa pelos pesos dos respectivos critérios. Se o critério for dividido em subcritérios multiplica-se o peso do critério pela somatória do peso da alternativa pelo peso dos respectivos subcritérios. Caso o subcritério possua o seu próprio subcritério repete-se o processo anterior, até que os pesos de todos os níveis tenham sido multiplicados e somados. Esse processo é realizado nas equações (2) e (3), utilizando os dados da tabela 5.

Tabela 5 Comparação final.

Critérios	Critério-1 0,5077		Critério-2 0,1132	Critério-3 0,3791	Prioridade geral
Subcritérios	Sub-1 0,8750	Sub-2 0,1250	x	x	
Alternativa 1	0,1000	0,1827	0,2500	0,8000	0,3876
Alternativa 2	0,9000	0,8173	0,7500	0,2000	0,6124

$$PG A1 = 0,5077 * (0,875 * 0,1 + 0,125 * 0,1827) + 0,1132 * 0,25 + 0,3791 * 0,8 = 0,3876 \quad (2)$$

$$PG A2 = 0,5077 * (0,875 * 0,9 + 0,125 * 0,8173) + 0,1132 * 0,75 + 0,3791 * 0,2 = 0,6124 \quad (3)$$

No ranking geral de prioridades, visto na tabela 5, temos um peso maior para alternativa 2 comparada a outra alternativa, logo para o problema em questão a alternativa 2 é uma melhor solução.

3 Redes Ópticas de Telecomunicações

3.1 Eficiência energética em redes ópticas de telecomunicações

As estruturas de rede e armazenamento de informação das TICs são compostas de dispositivos de alto desempenho que apresentam um alto consumo de energia. Visando garantir a qualidade e oferta dos serviços, é comum que as redes possuam uma arquitetura redundante, necessária para garantir a disponibilidade de serviços, o que por sua vez aumenta a quantidade de equipamentos utilizados. Tipicamente as redes de telecomunicações podem ser divididas em três domínios: núcleo ou *backbone*, metropolitana e de acesso. Tecnologias ópticas desempenham o um papel de grande importância no aumento da eficiência energética nesses três domínios [4].

A rede núcleo, como observada na figura 2, é parte central da hierarquia de telecomunicação, estendendo-se por longas distâncias que variam de algumas centenas até alguns milhares de quilômetros, e fornece uma cobertura global. A rede metropolitana, como o próprio nome sugere, se estende pela região metropolitana, cobrindo algumas centenas de quilômetros. A rede de acesso conecta os usuários finais ao seu provedor imediato de serviços e permite que estes conectem os usuários ao resto da infraestrutura de rede, cobrindo alguns quilômetros. Por serem menores em alcance, porém em maior quantidade, as redes metropolitanas e de acesso são menos eficientes energeticamente que as redes núcleo. Essas redes em conjunto representam cerca de 60% da energia total consumida pelas redes de telecomunicação, sendo as redes de núcleo responsáveis pelo resto [4].

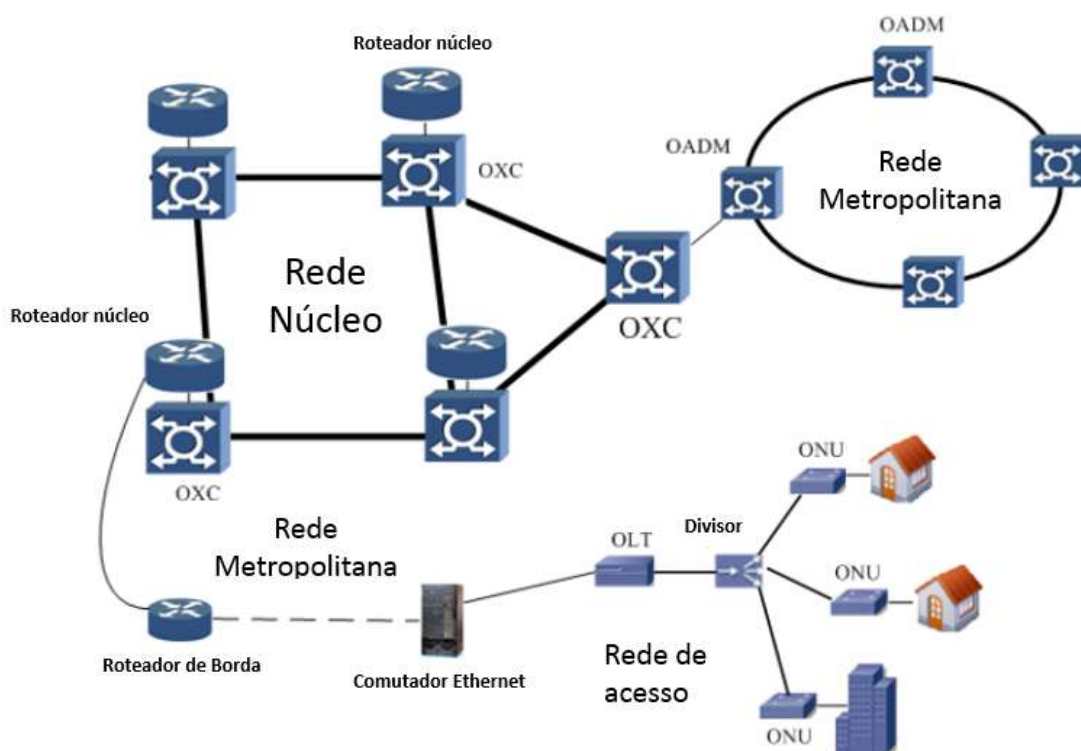


Figura 2 Hierarquia de redes de telecomunicações [4].

A redução do consumo de energia em redes ópticas pode ser abordada em quatro níveis, sendo eles: componentes, transmissão, rede e aplicação. Componentes de processamento no domínio óptico e com alto grau de integração vêm sendo estudados visando a redução do consumo de energia. Na transmissão, fibras de baixa atenuação e de baixa dispersão junto com transmissores e receptores ópticos de alta eficiência energética estão sendo introduzidos. No nível de rede, mecanismos para alocar eficientemente os recursos num roteamento que vem sendo chamado de “verde”, estão sendo estudados. Abordagens verdes para computação em nuvem e mecanismos para conectividade eficiente estão sendo propostos no nível de aplicações [4].

3.1.1 Redes Núcleo

A rede núcleo é a principal central da infraestrutura de uma rede de telecomunicação, conectando cidades, países e continentes. Sendo tipicamente uma malha de estruturas de interligações, carrega uma enorme quantidade de tráfego provenientes das áreas periféricas da rede. Assim, precisa ter uma interface apropriada para conectar-se às redes metropolitana e de acesso, para que os usuários separados por longas distancias possam comunicar-se através da rede núcleo. Tecnologias ópticas são amplamente utilizadas para suportar a infraestrutura física e atingir altas velocidades. Para manejar e controlar as redes ópticas, vários equipamentos de controles e tecnologias foram desenvolvidos, como *Packet over Synchronous optical networking (IP over SONET)* e *Packet over Synchronous Digital Hierarchy (IP over SDH)* ou *Packet over WDM (IP over WDM)*. As arquiteturas das redes núcleo são de multicamadas, logo o consumo de energia deve ser avaliado em todas as camadas, eletrônica e óptica [4].

Na tecnologia *IP over WDM*, vista na figura 3, os componentes que consomem energia são encontrados no roteamento e na transmissão. No roteamento os principais consumidores são os *Digital Cross-Connects (DXC)* e os roteadores de IP na camada eletrônica, *Optical Cross connects (OXC)* na camada óptica. WDM é uma tecnologia que multiplexa vários sinais ópticos em uma única fibra usando lasers de diferentes comprimentos de onda. Um multiplexador é usado para unir os sinais no transmissor e um demultiplexador no receptor os separa. *Transponders* são usados para transmitir e receber o sinal e dois amplificadores do tipo *Erbium-Doped Fiber Amplifier (EDFAs)*, *booster* e pré-amplificador, são usados para compensar a atenuação no multiplexador e para aumentar a sensibilidade do receptor, respectivamente. O consumo típico desses componentes pode ser visto na tabela 6, onde a potência indicada corresponde a uma situação de carga máxima [4].

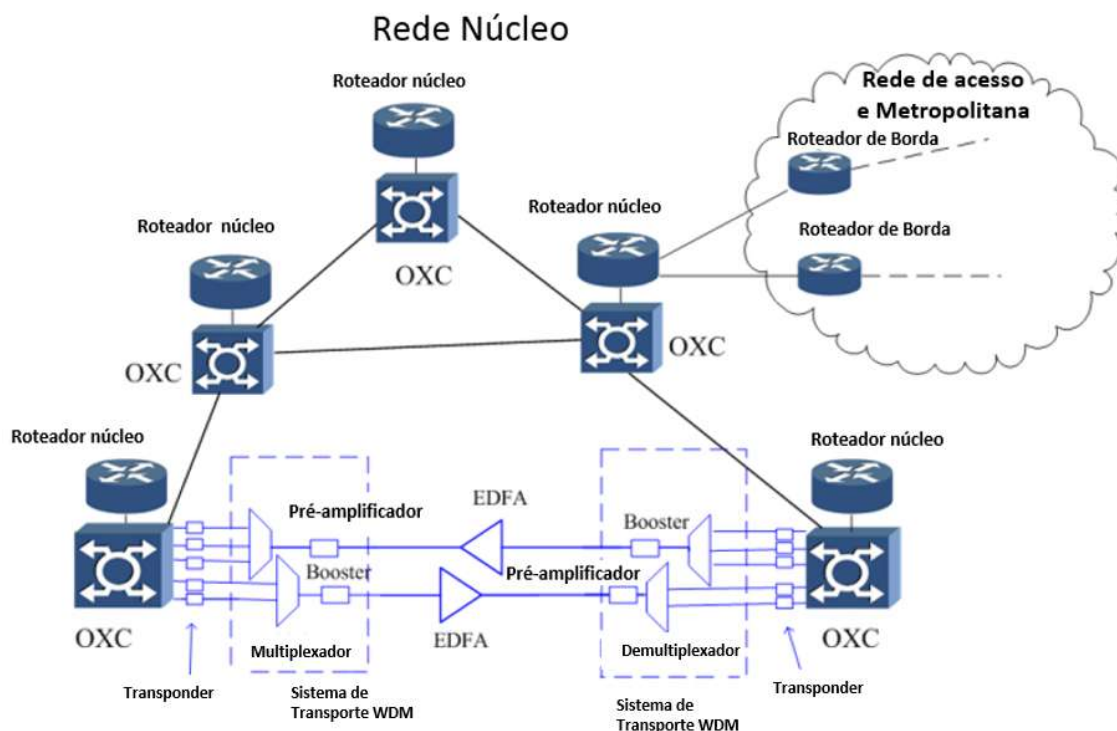


Figura 3 IP over WDM [4]

Tabela 6 Consumo de energia em diferentes componentes de redes de telecomunicação [4].

Domínio de Rede	Componente	Capacidade	Consumo de Energia
Rede Núcleo	Roteador Núcleo (Cisco CRS-1 Multi-Shelf System)	92 Tbps	1020 kW
	Comutador óptico-eletrônico (Alcatel-Lucent 1675 Lambda Unite MultiService Switch)	1,2 Tbps	2,5 kW
	Cross-Connect Óptico (MRV Optical Cross-Connect)	N/A	228 W
	Sistema de Transporte WDM (Ciena CoreStream Agility Optical Transport System)	3,2 Tbps	10,8 kW
	Transponder WDM (Alcatel-Lucent WaveStar OLS WDM Transponder)	40 Gbps	73 W
	EDFA (Cisco NOS 15501 EDFA)	N/A	8 W
Rede Metropolitana	Roteador de Borda (Cisco 12816 Edge Router)	160 Gbps	4,21 kW
	SONET ADM (Ciena CN 3600 Intelligent Optical Multiverse Switch)	95 Gbps	1,2 kW
	OADM (Ciena Select OADM)	N/A	450 W
	Gateway da Rede (Cisco 10008 Router)	8 Gbps	1,1 kW
	Comutador Ethernet (Cisco Catalyst 6513 Switch)	720 Gbps	3,21 kW
Rede de acesso	OLT (NEC CM7700S OLT)	1 Gbps	100 W
	ONU (Wave7 ONT-E1000i ONU)	1 Gbps	5 W

3.1.2 Redes Metropolitanas

A rede metropolitana cobre as regiões metropolitanas, conectando equipamentos para agregação dos usuários finais além de prover conexão com a rede núcleo. Na figura 4 são mostradas as três tecnologias dominantes na rede metro, SDH (*Synchronous Digital Hierarchy*), *Optical WDM* e *Metro Ethernet* [4]. A *Metro Ethernet*, uma infraestrutura comumente usada, é baseada no padrão Ethernet, sendo que seus componentes básicos são

roteadores de borda, *gateways* de rede de banda larga e comutadores Ethernet. O consumo destes elementos é encontrado na tabela 6.

Redes WDM em anel são propostas para aproveitar as vantagens da tecnologia óptica, altas velocidades e escalabilidade. Nessas redes o consumo vem principalmente dos Multiplexadores Ópticos *Add-Drop* (OADMs). Arquiteturas de anéis SDH também são bastante usadas na região metropolitana, e seu componente de maior consumo é o ADM (multiplexador *Add-Drop*). O consumo de ambos componentes é mostrado na tabela 6 [4].

3.1.3 Redes de Acesso

A rede de acesso, vista na figura 4, é a rede que conecta os usuários finais com a central de telecomunicação e também com a rede metropolitana. Ela compreende a maior parte da rede de telecomunicação, também sendo a maior consumidora de energia devido à presença de vários elementos ativos [4]. Várias tecnologias são usadas na rede de acesso como *Digital Subscriber Line* (xDSL), modem a cabo, redes sem fio com e sem mobilidade, *Fiber to the x* (FTTx), etc. Sendo elas classificadas em redes sem fio ou com fio. Sistemas DSL utilizam cabos de cobre, modem a cabo utiliza cabos coaxiais para fornecer internet junto com TV. Existem várias tecnologias FTTx sendo a mais usada a conhecida como rede óptica passiva (*Passive Optical Network*, PON) [4].

PON é a mais escolhida das redes de fibra óptica pois possui apenas elementos passivos. Na tabela 6 vemos o consumo dos dois principais componentes da arquitetura PON, sendo a OLT (terminal de linha óptica) localizada na central e a ONU (unidade ou terminal de rede óptica) localizada próxima ao consumidor final.

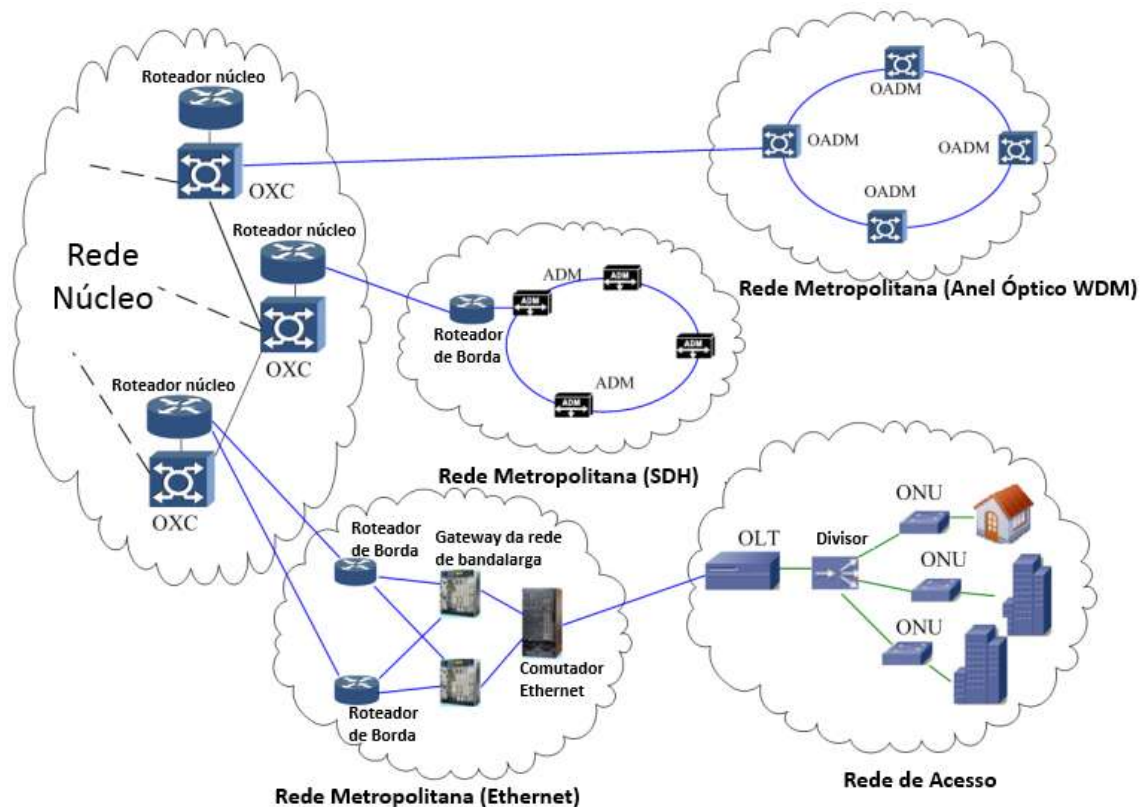


Figura 4 Redes metropolitanas e de acesso [4].

3.2 Perspectiva histórica de consumo energético

A eficiência energética dos sistemas de comunicação de longas distâncias tem melhorado com o passar do tempo, como visto na figura 5 [5], que mostra a evolução da energia por bit em comunicações transoceânicas. A primeira transmissão transatlântica de um sistema de telégrafo se tornou operacional no final da década de 1850. Por não ter repetidores a capacidade da linha de transmissão era limitada pela capacitância da linha. E a energia por bit era basicamente a energia gasta para carregar e descarregar essa capacitância [13].

As primeiras transmissões transatlânticas por sistemas sem fio eram de alto consumo energético, porém com os avanços tecnológicos o custo eventualmente ficou similar ao da energia consumida por bit do telégrafo, por volta de 0,1 J/b/1000 km. Com o uso de cabos coaxiais submarinos transoceânicos observou-se uma redução na energia por bit transmitido, uma tendência também observada nos primeiros sistemas ópticos, que usavam repetidores opto-eletrônicos [13].

A segunda geração de sistema ópticos usando amplificadores ópticos permitiu que a energia por bit fosse reduzida para 10 nJ/b/1000 km. Durante o período de 1960 até 2010,

pode-se observar na figura 4 que a energia por bit caiu exponencialmente, com uma taxa aproximada de 20% por ano [13]. Em comparação à eficiência dos sistemas ópticos de transporte terrestre durante o período de 1990-2008, a eficiência melhorou a uma taxa de 15% ao ano [14].

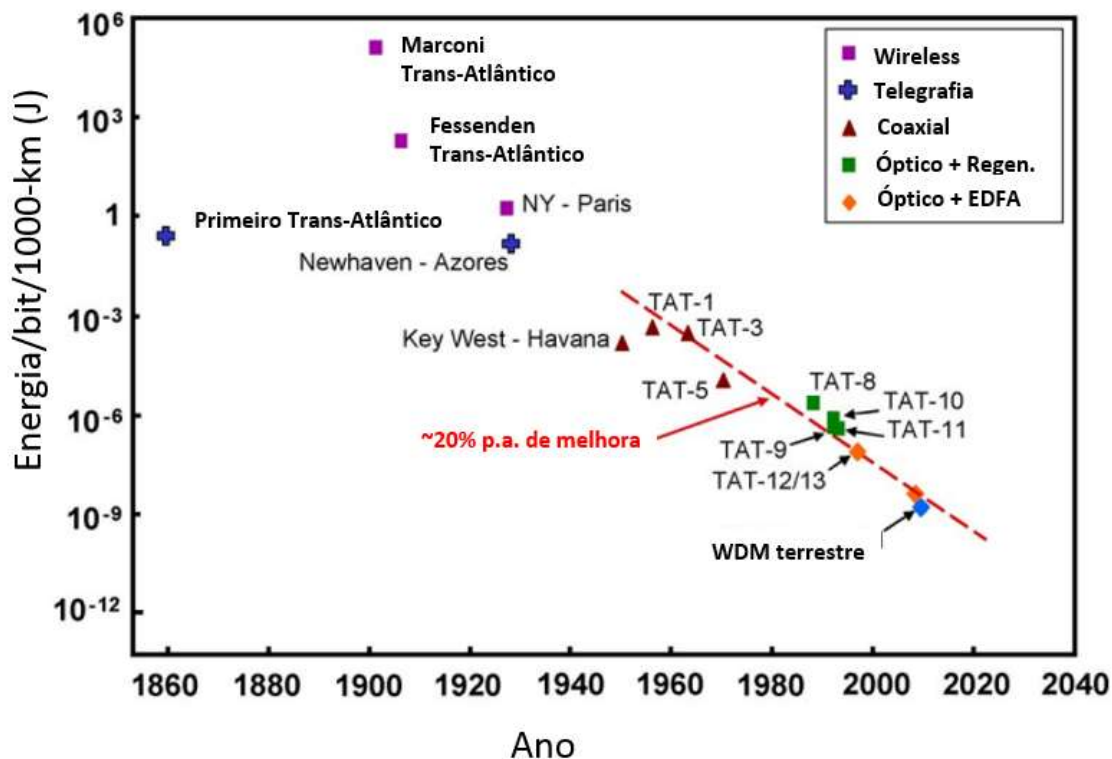


Figura 5 Energia por bit por 100km de transmissão [13]

3.3 Perspectiva futura

O alcance das TIC's está crescendo rapidamente no mundo e, conseqüentemente, o consumo energético causado por estas tecnologias também está aumentando apesar dos esforços que buscam o aumento da sua eficiência energética. O consumo gerado pela quantidade crescente de equipamentos e componentes para redes e comunicações, implantados anualmente, é grande o suficiente para anular os ganhos energéticos devido a novas tecnologias. Em 2009 a tecnologia de informação e comunicação consumia aproximadamente 8% da energia mundial [15]. Redes de telecomunicações, que representam uma parte significativa de TIC, fazem cada vez mais parte de nossas vidas diárias e numa projeção como a da figura 5 é possível observar o crescimento previsto para o consumo de energia das redes de telecomunicações nos próximos anos [16]. Considerando o aumento do preço da energia devido à redução da disponibilidade de combustíveis fósseis, e a crescente preocupação com os gases do efeito estufa, que vem motivado políticas governamentais visando seu controle, é de extrema importância desenvolver novas soluções energeticamente

eficientes em telecomunicações. É necessário projetar novos sistemas que mantenham o mesmo nível de funcionalidade enquanto consomem uma menor quantidade de energia.

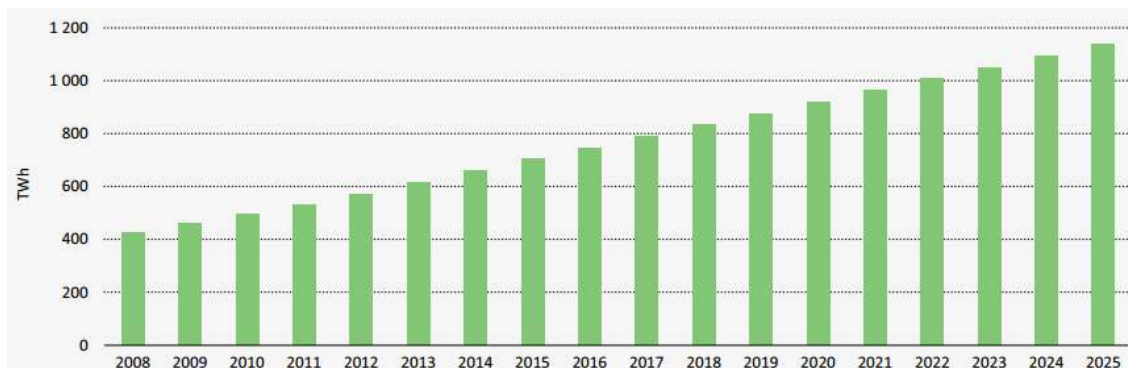


Figura 6 Consumo energético atual e previsão para ICT. Previsão começa em 2012[16].

3.4 Redes *Wavelength Division Multiplexing*

Em comunicação por fibra óptica, *Wavelength Division Multiplexing* é uma tecnologia que multiplexa vários sinais ópticos em uma única fibra óptica, usando diferentes comprimentos de onda. O objetivo é a multiplicação da capacidade de transmissão em um mesmo enlace.

Um sistema WDM emprega um multiplexador de feixes de luz provenientes dos transmissores, que são fontes de luz oscilando em diferentes comprimentos de onda. Na recepção um demultiplexador separa estes mesmos comprimentos de onda. Como em geral os enlaces se estendem por uma grande distância, é necessário o uso de amplificadores ópticos para garantir a integridade do sinal, sendo estes divididos em três categorias, amplificadores de linha, amplificadores de potência e pré-amplificadores. Outro componente é o comutador óptico, que encaminham um comprimento de onda específico originário de uma porta de entrada para uma porta de saída.

A transmissão de informação pelas redes ópticas é feita através de um caminho óptico (*lightpath*) designado. Estes são caminhos unidirecionais e utilizam o mesmo comprimento de onda durante todo o percurso ou diferentes comprimentos a cada salto (transmissão entre dois nós adjacentes). Para uso de comprimentos de onda diferentes num mesmo *lightpath* é necessário o uso de conversores de comprimento de onda.

As redes núcleo de telecomunicações devem possuir uma ótima qualidade de serviço e ter um elevado fator de confiabilidade, por isso devem garantir disponibilidade de serviço em tempo integral. Dessa forma é fundamental a existência de esquemas de proteção contra falhas, relacionadas aos enlaces ou aos caminhos ópticos, sendo que os esquemas podem ser dedicados ou compartilhados [9].

3.5 Tecnologias e estratégias para redução de consumo

Projeto de rede energeticamente eficiente em redes núcleo

É possível obter eficiência energética diretamente na etapa de projeto. Em [17] é proposta uma abordagem para IP-over-WDM na qual a energia dos roteadores de IP, EDFAs e *transponders* é juntamente minimizada. São consideradas duas formas de implementação, *lightpath non-bypass* e *by-pass*. Em *lightpath non-bypass* todos os *lightpath* incidentes em nó devem ser terminados, todos os dados transmitidos pelo *lightpath* são processados e encaminhados pelos roteadores de IP. Já na abordagem *lightpath by-pass* é permitido que o tráfego IP, cujo o destino não seja um nó intermediário, ignorar os roteadores passando diretamente por atalho. Resultados mostram que a abordagem *bypass* é mais econômica energeticamente.

Line cards e gabinetes consomem uma quantidade de energia considerável nas redes núcleo. Diferentes configurações resultam em diferentes consumos, quanto mais preenchido for o gabinete mais eficiente ele será. Isso porque mesmo um gabinete vazio consome energia, logo um altamente preenchido possui um baixo consumo por bit transferido. Logo, uma reconfiguração energeticamente eficiente pode reduzir o consumo de energia.

As redes ópticas existentes suportam uma taxa de linha de 10-40 Gbps e com a demanda crescendo algumas já suportam 100Gbps. Por isso as futuras redes ópticas precisarão suportar *Mixed Line Rates* (MLR), que são mais econômicas que *Single Line Rate* (SLR).

Encaminhamento do Pacote de IP energeticamente eficiente

Encaminhamento energeticamente consciente é proposto para diminuir o consumo na camada de IP. Em [18] é mostrado que o tamanho do pacote afeta o consumo dos roteadores. Para um cenário em que o tráfego é constante, quanto menor o pacote mais energia o roteador consome. Dessa forma, novos esquemas de encaminhamento de pacotes podem ser projetados para economizar energia. Porém, existe um compromisso entre o *delay* de chaveamento e a eficiência energética.

Em [19] uma outra abordagem é proposta, encaminhamento *pipeline*. É um esquema de chaveamento de pacotes baseado em tempo (*Time-Driven Switching*) e permite a expansão do chaveamento energeticamente eficiente por toda a rede. Duas sub-redes são propostas baseadas em encaminhamento pipeline, uma é a internet atual e outra "*super-highway*" onde o encaminhamento *pipeline* é implementado, figura 7. A rede assíncrona de roteadores IP é usada para transportar o tráfego comum e os sinais necessários para ativar o encaminhamento síncrono da rede paralela que carrega o tráfego pesado, como vídeos, jogos em demanda entre outros. É esperado que no futuro o tráfego pesado represente 90% da internet.

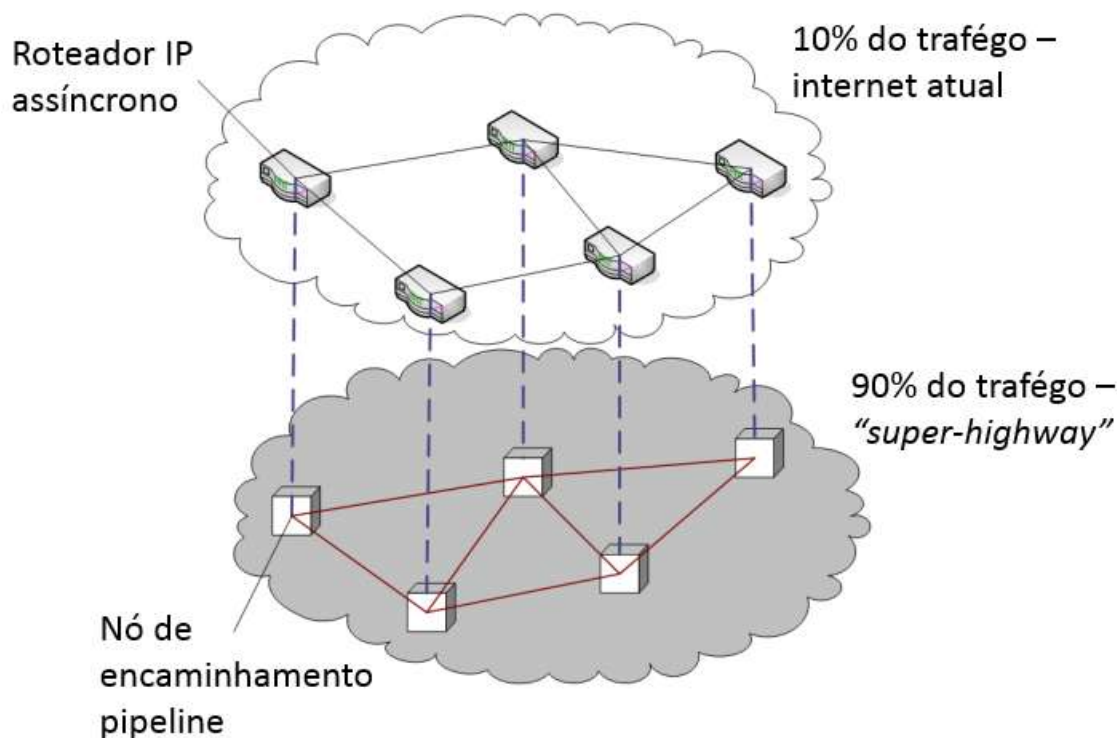


Figura 7 Redes paralelas na mesma infraestrutura [4]

Energy-driven Network

Embora eficiência energética seja parte da solução considerando o rápido crescimento da demanda por produto e serviços de TIC, é esperado que o aumento em eficiência não seja suficiente para contrabalancear esse crescimento. Uma vez que uma eficiência maior resulta em um produto mais barato, estimulando o consumo do mesmo e conseqüentemente aumentando a energia consumida. Por isso, depender apenas no melhoramento de eficiência energética não é suficiente para reduzir as emissões de carbono. Considerando esses fatores, uma solução complementar são as redes ópticas *energy-driven*. Essas redes ajustam seus comportamentos e performances de acordo com a fonte de energia que alimenta a rede e seus componentes, dessa forma até mesmo uma rede energeticamente ineficiente pode ter uma pequena emissão de carbono se for alimentada por fontes energéticas não poluentes. Eficiência energética e consciência energética podem ser alcançadas na próxima geração de redes ópticas através de um quadro de vários níveis orientados por energia e esquemas de otimização. Na figura 8 é possível observar uma rede IP óptica que incorpora técnicas verdes em diversos níveis [5].

Visando a redução da emissão de gases do efeito estufa, que pode ajudar com o aquecimento global e problema ambiental, a energia renovável é uma das abordagens considerada mais atrativas. A ideia é estabelecer os servidores, as chaves e os *data centers* em áreas onde energia renovável pode ser encontrada e rotear o tráfego por essas áreas. Elementos de outras áreas da rede podem requisitar que os equipamentos das “áreas verdes”

transfiram a demanda de tráfego por controle remoto, figura 8. Essa abordagem estabelece uma conexão entre redes energeticamente eficientes e utilização de energia renovável [5].

No planejamento de redes ópticas *energy-driven*, o problema de atribuição de roteamento e de comprimentos de onda ou *routing and wavelength assignment* (RWA) é abordado considerando o consumo de energia. Algoritmos RWA energeticamente eficientes utilizam tipicamente os mesmos links de rede durante todo o caminho tanto quanto o possível para maximizar o uso de componentes que já estão ligados. Considerando a fonte de energia que alimenta os nós, e tentando evitar os que consomem combustíveis fósseis, tem-se um RWA energeticamente eficiente e consciente. Um plano de controle energeticamente habilitado que suporte eficiência energética e consciente RWA durante operação. O plano de controle distribui parâmetros relacionados à energia incluindo a fonte e especificações de consumo dos elementos da rede, impondo a característica consciência energética em várias operações da rede. O plano de controle também será capaz de trocar informações sobre o estado de energia dos nós da rede, ligado, desligado ou em espera [5].

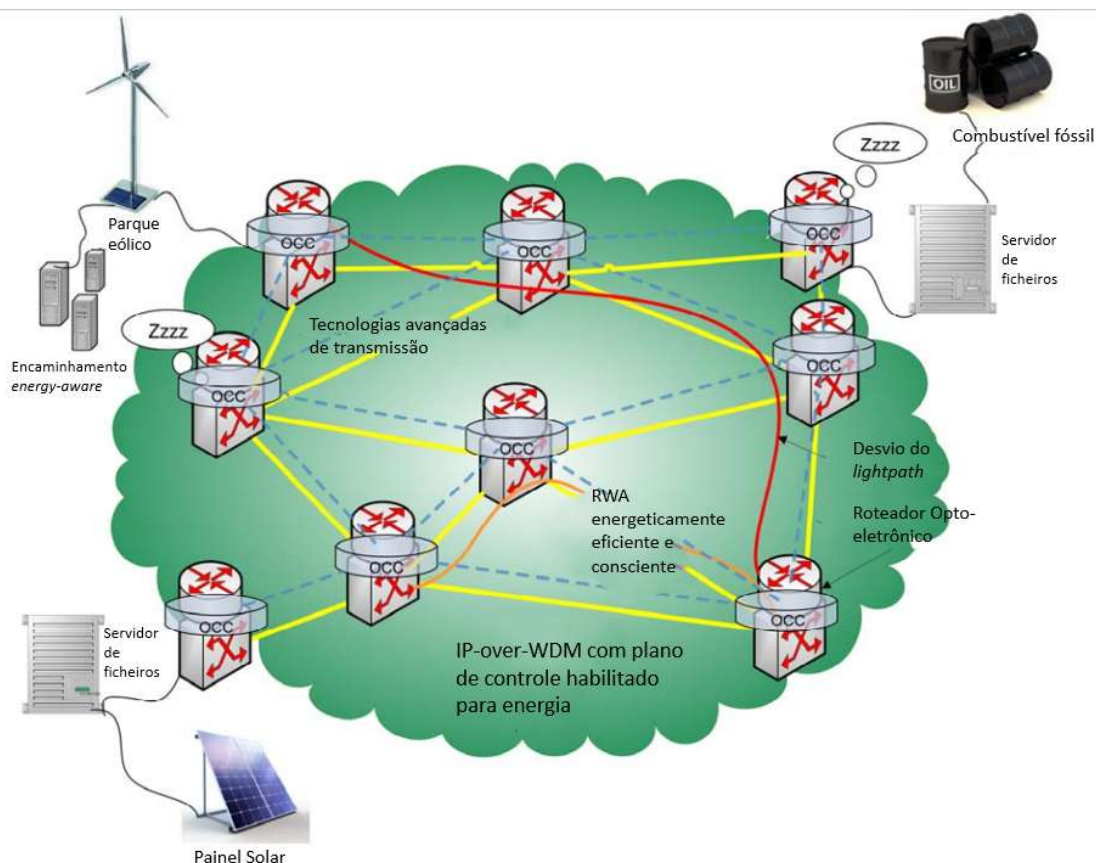


Figura 8 Roteamento verde com a disponibilidade de energia renovável [5].

Traffic Grooming

Traffic Grooming é considerada uma função chave em redes WDM, nas quais múltiplos tráfegos de baixa velocidade são unidos em um comprimento de onda de alta capacidade. Abordagem energeticamente conscientes de *traffic grooming* pode também ajudar a reduzir o

consumo de energia de uma rede núcleo, pois os equipamentos da rede consomem uma quantidade de energia considerável mesmo sem fluxo de dados e o consumo de energia da maioria dos chaveamentos e transmissões depende na carga do tráfego, essa abordagem pode reduzir o consumo de energia por elementos da rede [4].

Encaminhamento óptico

Encaminhamento óptico é um método para reduzir o consumo de energia nos segmentos de rede metropolitana e de acesso através tem um transporte todo óptico. É um transporte óptico capaz de transmitir comprimentos de ondas individuais entre a localização do hub central e dos pontos de acesso remotos. Para suportar provisões e reconfigurações flexíveis, os comprimentos de ondas são roteados por elementos ópticos ativos [7].

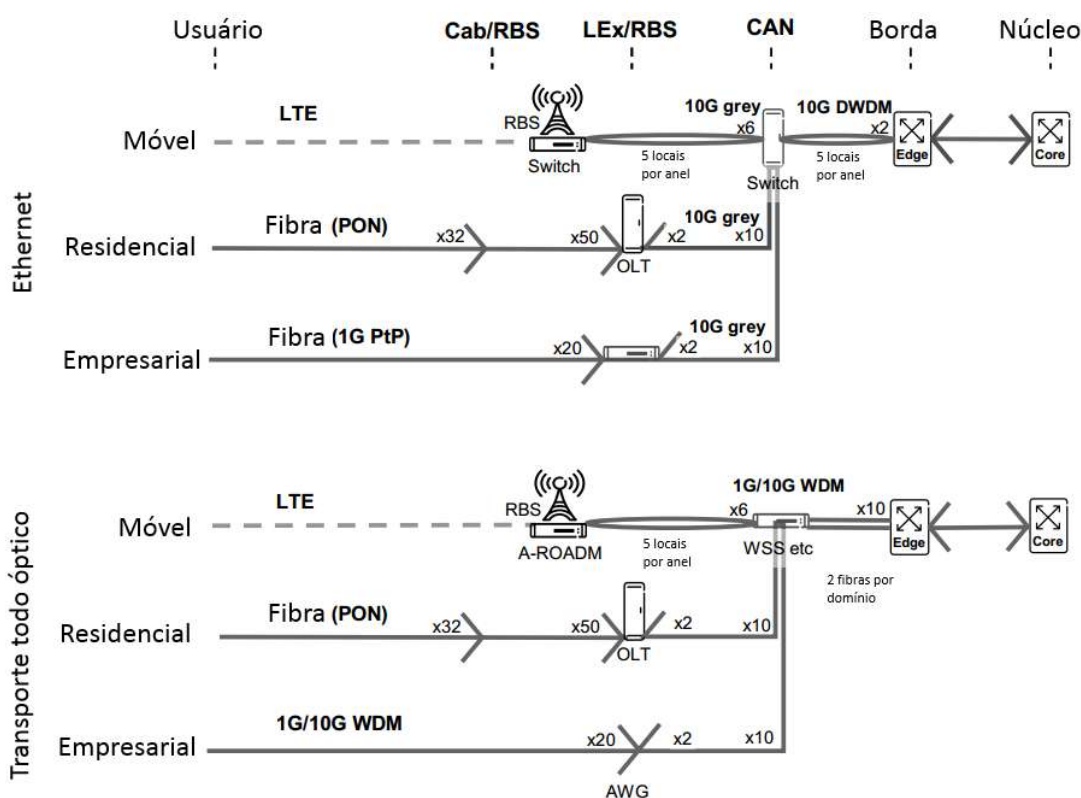


Figura 9 Comparação entre Ethernet e uma solução toda óptica [7].

A figura 9 mostra uma comparação entre um transporte todo óptico e uma portadora Ethernet. A principal diferença entre as duas é que no nó de agregação central (CAN) os switches de Ethernet são substituídos por WSSs (*Wavelength selective switching*). Na tabela 7 podem ser vistas a hipóteses de avaliação de potência consumida feitas por Björn Skubic [7]. Essa avaliação confirma que economias significativas podem ser atingidas. Ganhos grandes são vistos no CAN e no anel RBS com a redução de conversões elétricas ópticas e redução de encaminhamento elétrico.

Tabela 7 Avaliação de potência [7].

Componentes Ópticos	Potência (W)
---------------------	--------------

grey 1G, 10 km, SFP	0,5
grey 10G, 10km, XFP	3
DWDM 1G, SFP	1
DWDM 10G, XFP	2,5
DWDM 10G, 60 km, XFP 100 GHz	3,5
DWDM 10G, 60 km, XFP, 25 GHz	3,5
RSOA SFP, 1G	0,7
40Ch 1G PIC, 25 GHz, 40G CFP	35
10Ch 10G PIC, 25 GHz, 100G CFP	20
WSS 1:N, C+L, 25 GHz	12
A-ROADM, M ch, 100 GHz	15
Comutadores Ethernet de 36 Gbps	Potência (W)
Comutador completo 8x1G	53
Comutadores Ethernet de 640 Gbps	Potência (W)
Chassis (ventiladores, comutadores de fabrica, etc)	100
Placa de linha 20x1G	42
Placa de linha 2x10G	42
Placa de linha 1x40ch 1G	60

Rede adaptável à carga

Nas redes atuais, o consumo de energia exibe uma dependência limitada da carga de tráfego. Considerando as altas variações de tráfego em longas e curtas escalas de tempo, um dos caminhos de redução da potência da rede é melhorar o escalonamento do consumo da rede por reduzir o consumo dos equipamentos em uma situação de carga baixa [9].

O conceito de rede adaptável à carga pode ser aplicado em todos os segmentos de rede: metropolitana, núcleo e de acesso. Na rede de acesso, uma alta economia de energia é esperada não só porque representa grande parte da potência consumida na rede, mas também porque a carga média é relativamente baixa (alto pico para uma taxa média). Porém, devido à estrutura tipo árvore da rede de acesso a oportunidade de re-rotear para maximizar as economias não existe. Os tempos de 'despertar' dos equipamentos para um modo de operação são determinados pelos requisitos do sistema. Nos segmentos centrais da rede a utilização é alta e por isso há menos potencial para economia de energia. A existência de rotas alternativas de tráfego abre a possibilidade para um controle de tráfego otimizado para economia de energia no qual elementos ou links são desligados em carga baixa [9].

A definição de estados de hardware apropriados para serem controlados pelo sistema de controle de energia é um dos elementos chave para uma rede adaptável à carga. A figura 10 ilustra o impacto de diferentes granularidades dos equipamentos para o controle do estado de energia, onde elementos internos que podem ser controlados separadamente são representados por uma potência e tempo de acordar individuais, embora aumentando-se a granularidade também se aumenta a complexidade do problema de controle [7].



Figura 10 Estados de energia de equipamentos de rede [7].

Modos suspenso

Um método para economizar energia nas redes de telecomunicações é deixar em 'modo suspenso' ou 'em espera' elementos inativos quando o tráfego está reduzido, uma vertente da rede adaptável à carga, mantendo-se apenas ligadas as funções vitais da rede para suportar o tráfego residual. Observando a figura 3, vemos que alguns nós são redundantes na rede e que podem ser postos em modo suspenso quando não forem a fonte ou destino do tráfego e não forem nós essenciais de transferências. Os nós podem ser colocados em espera quando estiverem totalmente não utilizados, quando o tráfego estiver abaixo de um limite e tráfego residual puder ser redirecionado, quando o tráfego for redirecionado a outros roteadores para evitar interrupção. Esses três casos envolvem uma variedade de pesos em relação ao controle, gerenciamento e operação da rede. O primeiro caso requer um controle de rede adicional mínimo, o segundo requer coletar o congestionamento de informações e o terceiro só pode ser aplicado em rede que tenha alguma forma de provisionamento automático [4].

De maneira similar, os enlaces podem ser postos em espera quando não houver transmissão de dados por eles, quando o tráfego estiver abaixo de um limite ou for possível rotear novamente os dados fluindo por ele para outro enlace. Infelizmente, a maioria dos elementos em uma rede núcleo não podem ser postos em modo suspenso sem afetar o desempenho da mesma. Colocar em espera um nó intermediário pode causar o roteamento para uma rota maior, o que na maioria das vezes não é aceitável por causa do aumento do congestionamento e maior atraso. Prezando a conectividade e a qualidade de serviço, a possibilidade de se pôr em modo suspenso enlaces ou nós tem que ser cuidadosamente avaliada [4].

A fim de maximizar a energia economizada, o número máximo de enlaces e nós que podem ser postos em espera enquanto se mantém o suporte ao tráfego em andamento corresponde a um problema NP(Non-Deterministic Polynomial time)-difícil e pode ser formulado como um *mixed integer linear programming* (MILP). Assumindo que a demanda fora do horário de pico chega a ser 60% menor, é possível reduzir o número de nós energizados para até 17% e de enlaces para até 55%. E mesmo assim garantir que os recursos utilizados ainda estejam dentro do limite [4].

Rede de acesso *energy-aware*

- 1) PON: Há duas variantes populares de PON: EPON (Ethernet PON) que usa Ethernet como um mecanismo de transporte subjacente e GPON (Gigabit PON) uma evolução da PON do padrão banda larga PON (BPON). No nível de sistema as tecnologias PON estão sendo melhoradas para prover eficiência energética pelo uso de circuitos integrados com menor consumo de energia, dispositivos como drivers de laser operando em rajada (*burst-mode*) e chips que desligam funções inativas como processadores embarcados espertos. Embora nenhum dos padrões tenha incorporado inicialmente eficiência energética, existem algumas recomendações de como construí-los dessa forma [4].
 - a) EPON: É proposta a implementação de um estado de espera, estima-se que nesse estado a energia consumida por uma ONU seja 10 vezes menor que em um estado ativo. Também é proposto um mecanismo adaptativo que permite o chaveamento da taxa de link entre OLT e ONU para conservar energia [20].
 - b) GPON: É possível economizar energia na UNI (*User Network Interface*) (que conecta a ONU ao equipamento dos usuários) desligando-a quando não estiver em uso, porém não é difícil detectar quando a UNI não está ativa uma vez que os dispositivos conectados estão sempre comunicando. Também é possível reduzir a velocidade das UNI que não estão sendo usadas totalmente.
Energia também pode ser economizada na ANI (*Access Network Interface*) que conecta a ONU a OLT, desligando a ONU totalmente, porém tem um impacto enorme na qualidade de serviço. Outra técnica é a redução de velocidade da PON em períodos de baixa utilização [21].
- 2) xDSL: Um dos maiores desafios em xDSL é reduzir a interferência eletromagnética conhecida como diafonia ou *crosstalk*, que ocorre devido à interferência de sinal de diferentes linhas no mesmo pacote de cabo. Reduzindo o *crosstalk* é possível melhorar a eficiência de operação e de energia. Há dois métodos para redução de *crosstalk* em linhas DSL, sendo eles *Smarts DSL* e DSM (*Dynamic Spectrum Managment*). *Smart DSL* introduz um ruído de baixo nível na linha para mascarar o *crosstalk*. DSM coordena os espectros e sinal de todos os usuários para reduzir o *crosstalk* [22].
- 3) WOBAN: É uma proposta para uma combinação otimizada de uma *backhaul* óptico e um *front-end* sem fio. Na WOBAN o segmento PON começa na CO (*central office*) de telecomunicações e serve várias ONUs. Uma ONU pode servir vários *gateways* sem fio. A capacidade redundante no *backhaul* óptico aumento a confiabilidade da rede durante uma falha, já que o tráfego pode ser roteador por caminhos alternativos na *front-end wireless*. Essa flexibilidade pode ser explorada em horas de baixa carga para possibilitar economia de energia, colocando a parte afetada em modo de espera e roteando o tráfego afetado para outras partes da rede [23].
- 4) PON de longo alcance: LR-PON (*long reach PON*) é proposta com uma solução para futuras bandas larga ópticas da rede acesso, e estende a cobertura tradicional da PON para mais de 100 km, através de amplificadores ópticos e tecnologias WDM. Dessa forma LR-PON consolida diversas centrais em uma, reduzindo o uso de energia. Na LR-PON, cada segmento PON usa a topologia tradicional e o OLT é conecto a esses segmentos PON por um anel de fibra e nós remotos [24].

Arquiteturas em redes metro

Três arquiteturas são consideradas em [25] para uma rede unidirecional WDM: rede óptica FG (First-Generation), rede SH (Single-Hop) e rede MH (Multi-Hop). Na rede óptica FG cada nó deve processar eletronicamente todo tráfego de entrada e saída, incluindo tráfego em trânsito. Na rede SH todos os nós processam eletronicamente somente o tráfego de entrada ou saída da rede pertencente a aquele nó. A rede MH está entre os dois.

A conservação de energia na rede é proposta minimizando-se a energia requerida nos componentes ópticos e eletrônicos. O consumo de energia da rede MH é menor que a da rede FG tanto em baixa quanto em alta capacidade. Quando a taxa de conexão é baixa a rede MH é mais eficiente que a rede SH pois tem uma flexibilidade maior para realizar a multiplexação do tráfego de uma maneira eficiente [25].

4 Aplicação da Técnica a um Caso

4.1 Introdução ao Caso

Como um estudo de caso a técnica AHP será aplicada ao trabalho de Nereida Valdivia [18], onde são estudadas quatro diferentes estratégias de roteamento adaptado à carga real de tráfego baseado em modo suspenso aplicada às redes WDM (*Wavelength Division Multiplexing*) com proteção dedicada de caminhos (DPP). Cada estratégia tem um objetivo diferente, a *Shortest Path-DPP* (SP-DPP) faz o roteamento pelo caminho mais curto, a *Energy Aware-DPP* (EA-DPP) aloca a demanda por enlaces que estejam ativos, a *Energy Aware-DPP with Mixing* (EA-DPP-MixS) evita que os caminhos principais sejam roteados por enlaces que já pertencem aos caminhos de proteção e a *Energy Aware-DPP with Differentiation* (EA-DPP-Dif) evita alocar diferentes caminhos no mesmo enlace [9]. Algumas estratégias resultam em maior consumo e menor probabilidade de bloqueio e outras em menor consumo, porém com maior probabilidade de bloqueio. Buscando-se um equilíbrio entre economia de energia e qualidade de serviço, a autora propõe um novo roteamento, chamado de roteamento intensivo.

A autora do estudo desenvolve, então, o algoritmo para o roteamento intensivo cujo objetivo é prover uma melhora da qualidade de serviço em relação às outras estratégias estudadas e ao mesmo tempo ser energeticamente eficiente. Este algoritmo é baseado na diferenciação de caminhos e visa pôr em modo suspenso elementos da rede que somente transportem caminhos de proteção [9].

Considerando que o objetivo do trabalho é a economia de energia em redes ópticas WDM, é necessário avaliar o consumo da mesma. Para isso é determinado quais componentes da rede consomem energia e a quantidade de energia consumida por eles, ou seja foi definido um modelo de consumo de energia.

Após determinar o modelo de consumo de energia foram escolhidas três redes para serem usadas na avaliação de desempenho: (i) A rede europeia COST239, composta de uma rede núcleo e três subredes; (ii) rede americana USNet, uma rede em malha compostas por 24 nós; (iii) e a rede brasileira Ipê com 22 pontos de enlace WDM com possibilidade de DPP.

A análise e comparação de desempenhos dos algoritmos são feitas com o auxílio de geração de tráfego. Tráfego é gerado sobre as redes citadas anteriormente, seguindo certas características como origem e destino, carga do tráfego, o número de conexões, a duração das conexões e o tempo de espera entre conexões [9]. Testes são então realizados com carga crescente de tráfego.

Após realizar os testes foram obtidos os gráficos de resposta das figuras 11 e 12. Na figura 11 observamos que a EA-DPP-Dif-Intensivo possui a maior eficiência energética da rede COST239 e fica em terceiro lugar nas outras duas redes, atrás das estratégias EA-DPP-MixS e EA-DPP-Dif. Já em relação à probabilidade de bloqueio pode ser ver na figura 12 que a EA-DPP-Dif-intensivo é a estratégia com a menor probabilidade de bloqueio em todas as redes de teste.

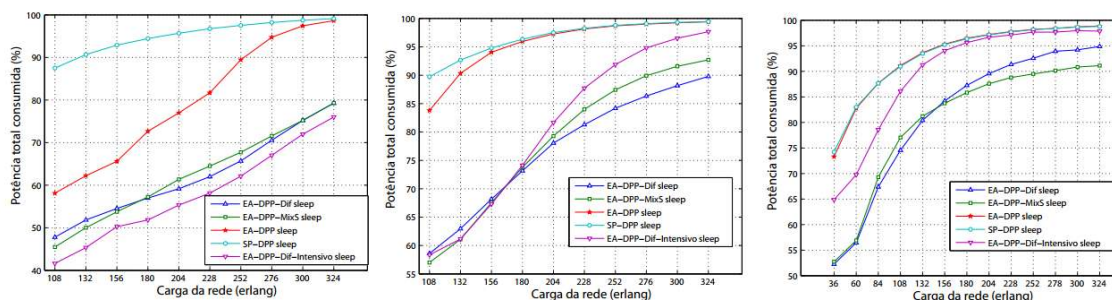


Figura 11 Potência total consumida nas redes a) COST239 b) USNet c) Ipê [9].

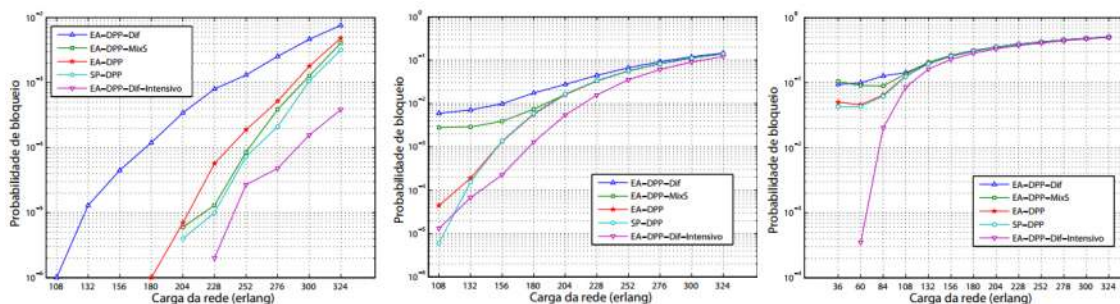


Figura 12 Probabilidade de bloqueio para as redes a) COST239 b) USNet c) Ipê [9].

4.2 Aplicação da técnica

Seguindo os passos para tomar uma decisão de forma organizada primeiramente definimos o problema ou objetivo, que é a escolha de uma estratégia de roteamento visando a redução no consumo energético sem perda de qualidade. Após a definição do problema é montada a estrutura hierárquica, vista na figura 13, que possui o objetivo (escolha de uma estratégia), os critérios e sub-critérios (economia de energia e probabilidade de bloqueio) e as alternativas para resolver o problema (SP-DPP, EA-DPP, EA-DPP-MixS, EA-DPP-Dif e EA-DPP-Dif-Intensivo). Deve-se então montar as matrizes de comparação com o auxílio da tabela 1. Nesse cenário existirão três matrizes de comparação, uma entre os critérios, vista na tabela 8, e duas de comparação entre as alternativas e os critérios, porém essas variam para cada rede, tabelas 9 e 10 para a rede Cost239, tabelas 11 e 12 para rede USNet e tabelas 13 e 14 para rede Ipê.



Figura 13 Hierarquia da AHP aplicada para escolha de uma estratégia de economia de energia

Para atribuir valores às matrizes, é usado a escala de importância da tabela 2, que permite traduzir o nível de importância de cada elemento da matriz para números. Como se pretende escolher uma estratégia na qual a qualidade de serviço é importante, porém sem ignorar o consumo energético, atribui-se importância moderada da economia de energia sobre a probabilidade de bloqueio, resultando nos valores da tabela 8. Já os valores das tabelas 9 a 14 foram atribuídos com base nos resultados dos testes de [9], que podem ser vistos nas figuras 11 e 12.

Tabela 8 Matriz de comparação dos critérios para escolha de uma arquitetura.

Escolher uma Arquitetura	Economia de Energia	Probabilidade de Bloqueio
Economia de Energia	1,0000	0,3333
Probabilidade de Bloqueio	3,0000	1,0000

Tabela 9 Matriz de comparação entre as alternativas e o critério economia de energia para a rede Cost239.

Economia de Energia	SP-DPP	EA-DPP	EA-DPP-MixS	EA-DPP-Dif	EA-DPP-Dif-Intensivo
SP-DPP	1,0000	0,3333	0,1667	0,1667	0,1429
EA-DPP	3,0000	1,0000	0,2000	0,2000	0,1667
EA-DPP-MixS	6,0000	5,0000	1,0000	1,0000	0,3333
EA-DPP-Dif	6,0000	5,0000	1,0000	1,0000	0,3333
EA-DPP-Dif-Intensivo	7,0000	6,0000	3,0000	3,0000	1,0000

Tabela 10 Matriz de comparação entre as alternativas e o critério probabilidade de bloqueio para a rede Cost239.

Probabilidade de Bloqueio	SP-DPP	EA-DPP	EA-DPP-MixS	EA-DPP-Dif	EA-DPP-Dif-Intensivo
SP-DPP	1,0000	3,0000	2,0000	6,0000	0,2500
EA-DPP	0,3333	1,0000	0,3333	5,0000	0,2000
EA-DPP-MixS	0,5000	3,0000	1,0000	6,0000	0,2500
EA-DPP-Dif	0,1667	0,2000	0,1667	1,0000	0,1429
EA-DPP-Dif-Intensivo	4,0000	5,0000	4,0000	7,0000	1,0000

Tabela 11 Matriz de comparação entre as alternativas e o critério economia de energia para a rede USNet.

Economia de Energia	SP-DPP	EA-DPP	EA-DPP-MixS	EA-DPP-Dif	EA-DPP-Dif-Intensivo
SP-DPP	1,0000	0,5000	0,1667	0,1667	0,2000
EA-DPP	2,0000	1,0000	0,1667	0,1667	0,2000
EA-DPP-MixS	6,0000	6,0000	1,0000	0,5000	3,0000
EA-DPP-Dif	6,0000	6,0000	2,0000	1,0000	3,0000
EA-DPP-Dif-Intensivo	5,0000	5,0000	0,3333	0,3333	1,0000

Tabela 12 Matriz de comparação entre as alternativas e o critério probabilidade de bloqueio para a rede USNet.

Probabilidade de Bloqueio	SP-DPP	EA-DPP	EA-DPP-MixS	EA-DPP-Dif	EA-DPP-Dif-Intensivo
SP-DPP	1,0000	2,0000	5,0000	6,0000	0,3333
EA-DPP	0,5000	1,0000	4,0000	5,0000	0,2500
EA-DPP-MixS	0,2500	0,2500	1,0000	3,0000	0,2000
EA-DPP-Dif	0,2000	0,2000	0,3333	1,0000	0,1667
EA-DPP-Dif-Intensivo	3,0000	4,0000	5,0000	6,0000	1,0000

Tabela 13 Matriz de comparação entre as alternativas e o critério economia de energia para a rede Ipê.

Economia de Energia	SP-DPP	EA-DPP	EA-DPP-MixS	EA-DPP-Dif	EA-DPP-Dif-Intensivo
SP-DPP	1,0000	1,0000	0,2000	0,2000	0,3333
EA-DPP	1,0000	1,0000	0,2000	0,2000	0,3333
EA-DPP-MixS	5,0000	5,0000	1,0000	2,0000	4,0000
EA-DPP-Dif	5,0000	5,0000	0,5000	1,0000	4,0000
EA-DPP-Dif-Intensivo	3,0000	3,0000	0,2500	0,2500	1,0000

Tabela 14 Matriz de comparação entre as alternativas e o critério probabilidade de bloqueio para a rede Ipê.

Probabilidade de Bloqueio	SP-DPP	EA-DPP	EA-DPP-MixS	EA-DPP-Dif	EA-DPP-Dif-Intensivo
SP-DPP	1,0000	1,0000	3,0000	3,0000	0,2000
EA-DPP	1,0000	1,0000	3,0000	3,0000	0,2000
EA-DPP-MixS	0,3333	0,3333	1,0000	2,0000	0,1667
EA-DPP-Dif	0,3333	0,3333	0,5000	1,0000	0,1667
EA-DPP-Dif-Intensivo	5,0000	5,0000	6,0000	6,0000	1,0000

Na tabela 15 observamos os resultados dos cálculos das prioridades. Com esses valores é fácil deduzir que EA-DPP-Dif-intensivo é a melhor solução para uma rede que visa qualidade de serviço, sem desprezar a economia de energia. Também aplicamos o AHP com o objetivo de escolher uma estratégia com grande economia de energia e na qual a perda de qualidade não seja um problema, é necessário refazer apenas a matriz de comparação dos critérios em relação aos objetivos, tabela 16. Então se obteve um novo ranking de prioridades, tabela 17, no qual a EA-DPP-Dif-Intensivo não é a melhor solução para todas as redes, apenas para cost239, para USNet a melhor estratégia é EA-DPP-Dif e para a rede brasileira Ipê EA-DPP-MixS é a melhor.

Tabela 15 Ranking de prioridades das alternativas

Prioridades	Cost239	USNet	Ipê
SP-DPP	0,0813	0,1996	0,1320
EA-DPP	0,0716	0,1409	0,1325
EA-DPP-MixS	0,2038	0,1333	0,1618
EA-DPP-Dif	0,1719	0,1345	0,1224
EA-DPP-Dif-Intensivo	0,4714	0,3917	0,4513

Tabela 16 Matriz de comparação dos critérios para escolha de uma arquitetura priorizando a economia de energia

Escolher uma Arquitetura	Economia de Energia	Probabilidade de Bloqueio
Economia de Energia	1,0000	3,0000
Probabilidade de Bloqueio	0,3333	1,0000

Tabela 17 Ranking de prioridades das alternativas priorizando a economia de energia.

Prioridades	Cost239	USNet	Ipê
SP-DPP	0,0940	0,1106	0,0903
EA-DPP	0,0735	0,0931	0,0917
EA-DPP-MixS	0,1997	0,2357	0,3125
EA-DPP-Dif	0,1585	0,2925	0,2363
EA-DPP-Dif-Intensivo	0,4742	0,2681	0,2692

4.3 Análise dos resultados

O objetivo do roteamento intensivo é fornecer uma nova estratégia na qual sua qualidade de serviço é melhor que das outras alternativas, mas sem desconsiderar a economia de energia. Ao aplicar a técnica AHP com esse objetivo em mente, obtemos o ranking de alternativas visto na figura 14. Temos que para as três redes testadas o EA-DPP-Dif-Intensivo é a melhor alternativa, com seu peso variando de 0,39 até 0,47. Temos como a segunda melhor alternativa EA-DPP-MixS para as redes Cost239 e Ipê, com peso de 0,2 e 0,16 respectivamente, e SP-DPP para rede USNet, ambos com um peso que é metade do peso da EA-DPP-Dif-Intensivo.

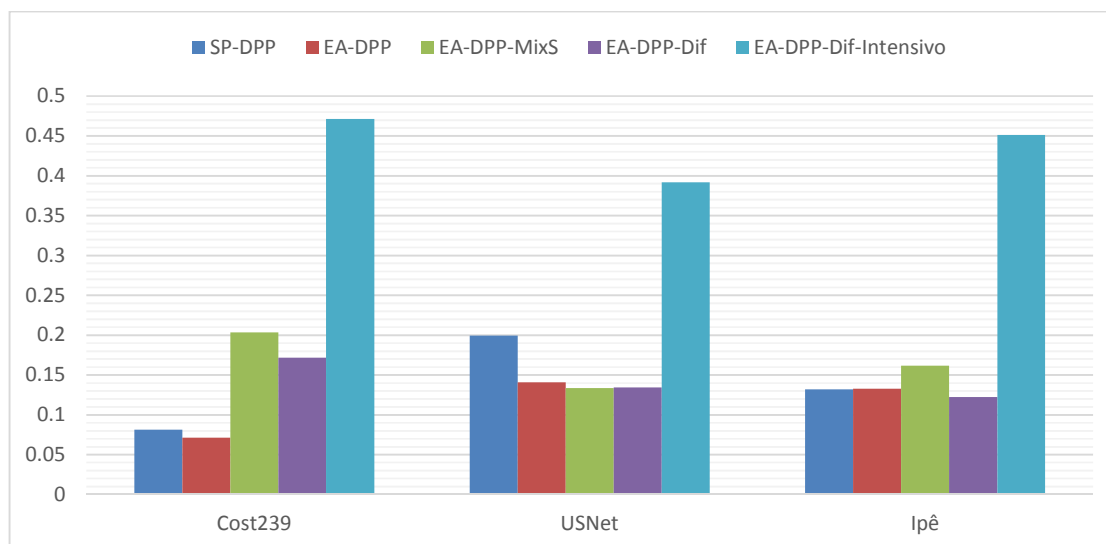


Figura 14 Comparação entre as alternativas para uma decisão com prioridade na qualidade de serviço

Já quando o objetivo é escolha de uma estratégia priorizando a economia de energia sobre a qualidade de serviço, o roteamento intensivo deixa de ser a melhor alternativa para todas as redes, como observado na figura 15. Para rede Cost239 a estratégia EA-DPP-Dif-Intensivo continua sendo a melhor opção com um peso de 0,47. Seguida pelo EA-DPP-MixS com um peso de 0,20. Na rede USNet a melhor alternativa é a EA-DPP-Dif com um peso de 0,39, em segundo está a EA-DPP-Dif-Intensivo com peso de 0,26 e em terceiro EA-DPP-MixS com peso de 0,23. Na rede Ipê a EA-DPP-Dif-Intensivo continua como a segunda melhor com peso de 0,27, porém dessa vez a melhor opção é a EA-DPP-MixS como peso 0,31 e em terceiro EA-DPP-Dif com 0,23 de prioridade.

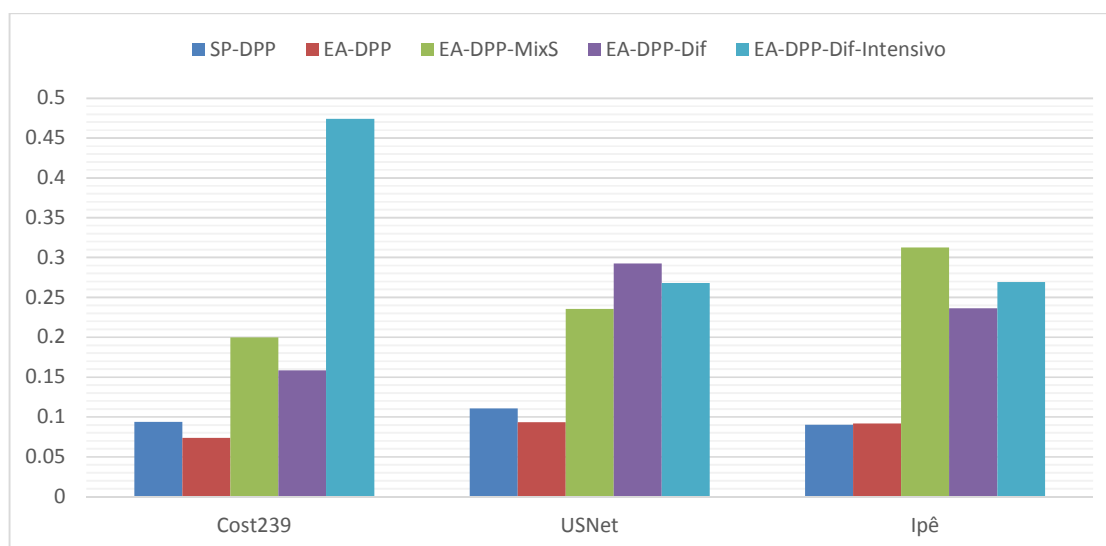


Figura 15 Comparação entre as alternativas para uma decisão com prioridade na economia de energia

5 Conclusão

Este trabalho focalizou o problema do consumo energético, que pode ocorrer numa escala global em um futuro próximo, e como ele está associado à evolução das redes de telecomunicação. Foram então apresentadas algumas tecnologias, técnicas e estratégias para melhorar a eficiência energética das redes com foco mais específico nas redes ópticas. Estas são de constituições variadas e afetam o consumo de forma diferente. Assim, escolher qual estratégia para economizar o consumo energético aplicável a casos específicos pode ser um processo complexo e, neste contexto, foi proposta a técnica de processo analítico hierárquico, AHP, como ferramenta auxiliar ao planejamento de redes de telecomunicação.

Essa técnica tem como objetivo facilitar e organizar o processo de decisão de forma lógica e eficaz. Para exemplificar o uso da mesma, essa técnica foi aplicada a um estudo de caso, no qual o objetivo era escolher a melhor estratégia de economia de energia para roteamento de canais em uma rede WDM. Ela foi aplicada duas vezes, primeiro considerando-se como prioridade a qualidade de serviço e depois como prioridade a economia de energia. Alguns resultados eram claros e poderiam ser identificados sem o uso da técnica de decisão, já outros resultados eram mais inesperados e o uso da AHP evitou que uma alternativa que não fosse a melhor opção fosse escolhida.

Com base neste exemplo relativamente simples e projetando para situações mais complexas, pode-se confirmar que em um universo como o de rede ópticas de telecomunicação o uso de ferramentas e modelos matemáticos para o planejamento das mesmas em tomadas de decisão permite que estas sejam realizadas de forma mais organizada e mais confiável.

Anexo A

Código 1 Programa principal, que chama os programas que realizam os cálculos

```
% Versão: 1.0          Data: 01/05/2015          Autor: Gabriel Stein
% Programa calcula qual a melhor alternativa para atingir um certo objetivo
% a partir de dados inseridos pelo usuário usando a técnica analytic
% hierarchy process (AHP)

prompt = ['Entre o objetivo: '];
objective = inputdlg(prompt);           %obtem o
objetivo do visado

prompt = 'Entre o numero de alternativas: ';
num_alte = input(prompt);               %obtem o
numero de alternativas atingir o objetivo

for i=1:num_alte
    vector_alt(i) = cellstr('nulo');
end

for i=1:num_alte
    prompt = ['Entre o nome da alternativa ', num2str(i), ': '];
    vector_alt(i) = cellstr(inputdlg(prompt)); %obtem os
nomes das alternativas
end

prompt = 'Entre o numero de criterios: ';
num_crite = input(prompt);             %obtem o
numero de criterios que influenciam a decisão sobre as alternativas
final_weight = subrank (num_crite,objective{1},num_alte); %roda um
subprograma para calcular a prioridade de cada alternativa
alternatives_vs_weight = cell(num_alte,2); %prepara
cell array para exibir os resultados
alternatives_vs_weight(:,2)= num2cell(final_weight);
alternatives_vs_weight(:,1)= vector_alt;
disp (alternatives_vs_weight);         %exibe o
resultado
```

Código 2 Cálculo da prioridade de cada ramo da hierarquia e da prioridade total

```
% Versão: 1.0          Data: 01/05/2015          Autor: Gabriel Stein
% Função recursiva que calcula a prioridade das alternativas em relação a um
% objetivo.

function weight_matrix = subrank (num_crit,objective,num_alt) %recebe
numero de critérios, objetivo e número de alternativas

    alter_weight_matrix = zeros(num_alt,num_crit); %zera a matriz para
evitar erros
    vector_crite = cell (1,num_crit); %cria um array de celulas

    for i=1:num_crit
        prompt = ['Entre o nome do criterio ', num2str(i), ':'];
```

```

        vector_crite(i) = cellstr(inputdlg(prompt));           %recebe o
nome de todos os critérios do nível atual
    end

    for i=1:num_crit %repete para todos os critérios

        prompt = ['Quantos subcritérios o critério ',vector_crite{i},'
possui: '];
        num_crite_sub = input(prompt); %verifica se critério em questão
possui subcritérios
        if num_crite_sub ~= 0 %se possui subcritérios realiza
            alter_weight_matrix (:,i) = subrank
(num_crite_sub,vector_crite{i},num_alt); %a função se chama para calcular a
prioridade do subnível seguinte
            disp (alter_weight_matrix);
        else %se não possui subcritérios
            prompt = ['Já existe um vetor normalizado para as alternativas
contra o critério ',vector_crite{i},' digite y ou n: '];
            vetor_nom_check = inputdlg(prompt);
            if (vetor_nom_check{1} == 'y'); %verifica se existe algum
valor quantitativa
                prompt = ['Entre o vetor normalizado para as alternativas
contra o critério ',vector_crite{i},' : '];
                alter_weight_matrix (:,i) = input(prompt); %salva essa
informação quantitativa
            else
                prompt = ['Entre a matrix de comparação alternativas contra
o critério ',vector_crite{i},' : '];
                comparison_matrix_alt = input(prompt); %entra matriz de
alternativas vs critério para determinar qual alternativa é melhor para o
critério atual
                alter_weight_matrix (:,i) = vetorprioridades
(comparison_matrix_alt); %calcula e salva a prioridade relativa a
alternativa de cada critério
            end
            disp (alter_weight_matrix);
        end

    end

    prompt = ['Entre a matrix de comparação entre os criterios de
',objective,': '];
    comparison_matrix_crit = input(prompt); %rece matriz de comparação
entre critérios para determinar qual é mais importante
    crit_weight_matrix = vetorprioridades (comparison_matrix_crit);
%calcula a prioridade dessa matriz
    disp (crit_weight_matrix);
    weight_matrix = alter_weight_matrix * crit_weight_matrix; %calcula a
prioridade geral
    disp (weight_matrix);
end

```

Código 3 Cálculo autovalores normalizados ou prioridade da matriz de comparação

```

% Versão: 1.0           Data: 01/05/2015           Autor: Gabriel Stein
% Função calcula os valores de prioridade normalizados de uma matriz

function vnormal = vetorprioridades(M) %recebe matriz em questão

```



```
d = size(M); % tamanho da matriz
[v,e] = eig(M); % determina autovalores da matriz
vttotal = 0;
for m=1:d(1)
    vttotal = vttotal + v(m,1); %calcula o valor para normalização
end
for n=1:d(1)
    vnormal(n,1)=v(n,1)/vttotal; %calcula os valores normalizados
end
end
```

Referências

- [1] REN21. **Renewables 2014 Global Status Report**. Paris, França: 2014. 21p. Disponível em:
<http://www.ren21.net/Portals/0/documents/Resources/GSR/2014/GSR2014_full%20report_low%20res.pdf>. Acesso em: 26 Maio 2015.
- [2] Karl, T. R.; Trenberth, K. E. Modern global climate change. **Science Magazine**, Washington, v. 302, n. 5651, p. 1719-1723, 2003.
- [3] JACOBSON, M. Z. Review of solutions to global warming, air pollution, and energy security. **Energy & Environmental Science**, n. 2, p. 149-150, 2009.
- [4] ZHANG Y.; CHOWDHURY P.; TORNATORE M.; MUKHERJEE B. Energy Efficiency in Telecom Optical Networks. **Communications Surveys & Tutorials, IEEE**, Nova Iorque, v. 12, n. 4, p. 441-458, 2010.
- [5] TOMKOS, I.; ANGELOU, M. New Challenges in Next-Generation Optical Network Planning. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON TRANSPARENT OPTICAL NETWORKS XII, 2010, Munique. **Proceedings...** Munique: IEEE, 2010. We.C1.1.
- [6] SAATY, T. L. Decision making with the analytic hierarchy process. **International Journal of Services Sciences**, v. 1, n. 1, p. 83-98, 2008.
- [7] SKUBIC, B. Energy Saving Opportunities in Next Generation Networks. In: EUROPEAN CONFERENCE AND EXHIBITION ON OPTICAL COMMUNICATIONS XXXVIII, 2012, Amsterdam. **Proceedings...** Amsterdam: IEEE, 2012. We.2.G.2.
- [8] VALCARENGHI, L.; CERUTII, I.; CASTOLDI, P. Energy Efficient Optical Access and Metro Networks. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON TRANSPARENT OPTICAL NETWORKS XII, 2010, Munique. **Proceedings...** Munique: IEEE, 2010. Tu.B1.2.

- [9] LIERENA VALDIVIA, N. C. **Roteamento de Tráfego e Alocação de Recursos em Redes Ópticas WDM com Base em Economia de Energia**. 2014. 122 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica e Área de Concentração em Telecomunicações) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2014.
- [10] FORMAN, E. H.; GASS, S. I. The Analytic Hierarchy Process – An Exposition. **Operations Research**, v. 49, n. 4, p. 469 – 486, 2001.
- [11] SAATY, T. L. Decision making with the analytic hierarchy process. **Scientia Iranica**, Tehran, v. 9, n. 3, p. 215-229, julho 2002.
- [12] BPMSG AHP Online System. Produzido por Goepel, K. D. Disponível em: <<http://bpmsg.com/academic/ahp.php>>. Acesso em: 04 maio 2015.
- [13] TUCKER, R. S. Green Optical Communications—Part I: Energy Limitations in Transport. **IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics**, v. 12, n. 2, p. 245-260, março 2011.
- [14] HAN, S. Moore’s law and energy and operations savings in the evolution of optical transport platforms. **IEEE Communications Magazine**, v. 48, n. 2, p. 66-69, fev. 2010.
- [15] LEISCHING, P.; PICAKVET, M. Energy footprint of ICT: Forecasts and network solutions. OPTICAL FIBER COMMUNICATION CONFERENCE AND EXPOSITION XXXII, 2009, San Diego. **Workshop...** San Diego, março 2009.
- [16] INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **More Data, Less Energy**. Paris, França: 2014. 45 p. Disponível em: <http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/MoreData_LessEnergy.pdf>. Acesso em: 25 junho 2015.
- [17] SHEN, G.; TUCKER, R. S. Energy-minimized design for IP over WDM networks. **Journal of Optical Communications and Networking**, v. 1, n. 1, p. 176-186, 2009.
- [18] CHABAREK, J.; SOMMERS, J.; BARFORD, P.; ESTAN, C.; TSIAN, D.; WRIGHT, S. Power awareness in network design and routing. CONFERENCE ON COMPUTER COMMUNICATIONS XXVII, 2008, Phoenix. **Proceedings...** Phoenix: IEEE, 2008. p. 457-465.
- [19] Li, C.-S. “Time-driven priority” flow control for real-time heterogeneous internetworking. JOINT CONFERENCE OF THE IEEE COMPUTER SOCIETIES XV, 1996, San Francisco. **Proceedings...** San Francisco: IEEE, 1996. p. 189-197.
- [20] MANDIN, J. EPON powersaving via sleep mode. 10GEPON TASK FORCE, 2008, Seoul. **Presentation Materials...** Seoul, 2008. Disponível em: <http://www.ieee802.org/3/av/public/2008_09>. Acesso em: 20 abril 2015.
- [21] EFFENBERGER, F. J. Opportunities for power savings in optical access. Fev. 2008. Disponível em: <<http://www.itu.int/dms-pub/itu-t/oth/09/05/T09050000010006PDFE>>. Acesso em: 10 março 2015.
- [22] TSIAFLAKIS, P.; YI, Y.; CHAING, M.; MOONEN, M. Green DSL: Energy efficient DSM. IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMMUNICATIONS, 2009, Dresden. **Proceedings...** Dresden: IEEE, 2009.

[23] CHOWDHURY, P.; TORNATORE, M.; SARKAR, S.; MUKHERJEE, B. Towards green broadband access networks. IEEE GLOBAL TELECOMMUNICATIONS CONFERENCE, 2009, Honolulu. **Proceedings...** Honolulu: IEEE, 2009.

[24] SHI, L.; LEE, S. S.; MUKHERJEE, B. Energy-efficient long-reach passive optical network: A dynamic wavelength allocation scheme. PHOTONICS IN SWITCHING, 2010, Monterey. **Anais...** Monterey: Optical Society of America, 2010. PTuB1.

[25] CERUTTI, I.; VALCARENGHI, L.; CASTOLDI, P. Power saving architectures for unidirectional WDM rings. OPTICAL FIBER COMMUNICATION CONFERENCE AND EXPOSITION XXXII, 2009, San Diego. **Proceedings...** San Diego: Optical Society of America, 2009. OThQ7.