

**RAFAEL MARQUES SANSÃO BORGES**

**PLANEJAMENTO DO CONSUMO DE  
ENERGIA EM SISTEMAS ÓPTICOS DE  
COMUNICAÇÃO: CAMADA DE REDE**

São Carlos

2012



**RAFAEL MARQUES SANSÃO BORGES**

**PLANEJAMENTO DO CONSUMO DE  
ENERGIA EM SISTEMAS ÓPTICOS DE  
COMUNICAÇÃO: CAMADA DE REDE**

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

Curso de Engenharia de Computação com  
ênfase em Sistemas de Comunicação e  
Computação Móvel

ORIENTADORA: Mônica Lacerda Rocha

São Carlos

2012

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.

B136p Borges, Rafael Marques Sansão  
Planejamento do consumo de energia em sistemas  
ópticos de comunicação: camada de rede / Rafael Marques  
Sansão Borges; orientadora Mônica Lacerda Rocha. São  
Carlos, 2012.

Monografia (Graduação em Engenharia de Computação)  
-- Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade  
de São Paulo, 2012.

1. consumo. 2. energia. 3. eficiência. 4. redes  
ópticas. 5. chaveamento. I. Título.

# FOLHA DE APROVAÇÃO

**Nome:** Rafael Marques Sansão Borges

**Título:** "Planejamento do consumo de energia em sistemas ópticos de comunicação: Camada de Rede"

**Trabalho de Conclusão de Curso defendido em** 29/11/2012.

**Comissão Julgadora:**

Prof. Titular Amílcar Careli César  
SEL/EESC/USP

**Resultado:**

APROVADO

Dr. Eduardo Martinelli Galvão de Queiroz  
SEL/EESC/USP

APROVADO

**Orientadora:**

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

**Coordenador pela EESC/USP do Curso de Engenharia de Computação:**

Prof. Associado Evandro Luís Linhari Rodrigues

*“O único lugar onde o  
sucesso vem antes do trabalho  
é no dicionário”*

*(Albert Einstein)*

## **Dedicatória**

Dedico este trabalho aos meus pais, Gilberto e Fátima por sempre me apoiarem nas minhas decisões.

Também dedico à minha irmã Luciana que sempre esteve presente nos momentos de necessidade e por me agüentar todo esse tempo.

## **Agradecimentos**

Aos meus amigos da universidade: Matheus Poiatti, Thiago Alberici, Vinicius Pereira, Vitor Jordão, Bruno Begotti, Caio Cesar, Jonathan William, Diego Grillo, Julio Cesar, Jonas Dourado, Eric Colombo e Ricardo Fernando, entre outros que batalharam junto comigo ao longo desses cinco anos.

À minha orientadora Mônica pelos conselhos e revisões sobre esse trabalho.

## **Resumo**

O consumo de energia em redes de telecomunicações é um assunto de destaque na atualidade. A redução desse consumo tem sido abordada em diversas pesquisas e é considerada como um dos fatores mais importantes para tornar essas redes “verdes”. Dentre as várias tecnologias da Tecnologia da Informação e Comunicação (TIC), a comunicação óptica tem sido amplamente utilizada devido à sua alta taxa de acesso e longo alcance. Neste trabalho é realizada uma revisão bibliográfica na qual os limites inferiores no consumo de energia elétrica em comunicações ópticas na camada de rede são analisados. Esse estudo é baseado na segunda parte do artigo do autor Rodney S. Tucker sobre o consumo de energia em redes ópticas de telecomunicação. O consumo energético de dispositivos de chaveamento (digitais e analógicos) é analisado e somado ao consumo de mecanismos de transporte previamente calculado, com a finalidade de se obter uma estimativa teórica nessas redes. Esse resultado é então comparado com as estimativas práticas alcançadas na atualidade e as diferenças entre elas são discutidas, bem como projeções futuras baseadas nessas análises.

Palavras-chave: consumo. energia. eficiência. redes ópticas. chaveamento.

## **Abstract**

The energy consumption in telecommunication networks is a prominent issue today. Reducing this consumption has been addressed in several studies and is considered one of the most important factors to make these networks "green." Among the various technologies of the Information of Communications and Technology (ICT), optical communication has been widely used because of their high access rate and long range. This paper is a literature review in which the lower bounds on energy consumption in optical communications at the network layer are analyzed. This study is based on the second part of the papers by Rodney S. Tucker on energy consumption in optical telecommunication networks. The power consumption of switching devices (analog and digital) is parsed and added to consumption transport mechanisms previously computed, in order to obtain a theoretical estimation of these networks. This result is then compared with practical estimates achieved today and the differences between them are discussed as well as future projections based on these analyzes.

**Keywords:** consumption. energy. efficiency. optical networks. switching.

## Sumário

<b>LISTA DE TABELAS .....</b>	<b>VIII</b>
<b>LISTA DE FIGURAS.....</b>	<b>IX</b>
<b>CAPÍTULO 1: INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1. CONTEXTUALIZAÇÃO E MOTIVAÇÃO .....	1
1.2. OBJETIVOS.....	3
1.3. ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO .....	3
<b>CAPÍTULO 2: DOMÍNIOS DE REDE E PESQUISAS ATUAIS .....</b>	<b>4</b>
2.1. CLASSIFICAÇÃO DOS DOMÍNIOS DE REDE .....	4
2.1.1. <i>Núcleo</i> .....	4
2.1.2. <i>Metro</i> .....	4
2.1.3. <i>Acesso</i> .....	5
2.2. ESFORÇOS DE PADRONIZAÇÃO .....	5
<b>CAPÍTULO 3: ANÁLISE E MODELAGEM .....</b>	<b>9</b>
3.1. ANÁLISE ATUAL E PROJEÇÕES DO CONSUMO DAS REDES .....	9
3.2. MODELO DE ENERGIA DE REDE .....	13
3.3. CONSUMO DE ENERGIA FIM A FIM .....	16
<b>CAPÍTULO 4: ANÁLISE DE EQUIPAMENTOS DE CHAVEAMENTO.....</b>	<b>18</b>
4.1. COMUTADORES LINEARES ANALÓGICOS .....	19
4.1.1. <i>Dispositivos Eletro-ópticos</i> .....	19
4.1.2. <i>Matrizes de Portas SOA</i> .....	21
4.1.3. <i>Matriz de Chaveamento Cruzado 2x2</i> .....	23
4.1.4. <i>Matrizes Chaveadas por Comprimento de Onda</i> .....	25
4.1.5. <i>Comutação por Pacotes</i> .....	26
4.2. COMUTADORES DIGITAIS .....	27

4.2.1. <i>Transistores CMOS</i> .....	27
4.2.2. <i>Dispositivos Ópticos Digitais</i> .....	30
<b>CAPÍTULO 5: CONSUMO DE ENERGIA DA REDE .....</b>	<b>34</b>
5.1. COMPARAÇÃO DE PROJEÇÕES DE ENERGIA .....	37
5.2. COMPARAÇÃO DE TECNOLOGIAS .....	38
<b>CAPÍTULO 6: CONCLUSÃO .....</b>	<b>40</b>
6.1. CONSTRUINDO UMA REDE “VERDE” .....	40
6.2. CONCLUSÃO .....	42
6.3. TRABALHOS FUTUROS .....	42
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>43</b>

## **Lista de Tabelas**

TABELA 1 - CONSUMO DE ENERGIA EM DISPOSITIVOS DE CHAVEAMENTO.....	31
TABELA 2 - ENERGIA MÍNIMA POR BIT $E_{NET}$ PARA DOIS CENÁRIOS DE REDE.....	35

## **Lista de Figuras**

FIGURA 1 - PORCENTAGEM DO CONSUMO DE ENERGIA X ANO, NO SETOR DE TIC E COM BASE EM 2009 .....	2
FIGURA 2 - ENERGIA POR $BIT (N\text{J})$ X DISPOSITIVOS DE CHAVEAMENTO (2010).....	9
FIGURA 3 - (A) ENERGIA POR $BIT (\mu\text{J})$ X ANO. (B) CONSUMO TOTAL DE POTÊNCIA NA REDE ( $W$ ) X ANO. ....	11
FIGURA 4 - MODELO SIMPLIFICADO DE UMA REDE GLOBAL.....	14
FIGURA 5 – (A) CHAVE ÓPTICA. (B) CHAVE ÓPTICA EM PLATAFORMA ELETRÔNICA. (C) CHAVE INTEIRAMENTE ELETRÔNICA.....	15
FIGURA 6 - OPÇÕES DE ENTRADA PARA UMA CHAVE O/E/O. ....	16
FIGURA 7 - ENERGIAS DE DISPOSITIVOS E CIRCUITOS DE CHAVEAMENTO.....	18
FIGURA 8 - DISPOSITIVO ELETRO-ÓPTICO DE ONDAS VIAJANTES.....	20
FIGURA 9 - MODELO SIMPLES DE UMA MATRIZ DE PORTAS SOA. ....	22
FIGURA 10 - (A) CHAVE $P \times P$ DE CRUZAMENTOS $2 \times 2$ . (B) CRUZAMENTO DILATADO, COM QUATRO CRUZAMENTOS ELEMENTARES. ....	24
FIGURA 11 - MATRIZ CHAVEADA PELO COMPRIMENTO DE ONDA.....	26
FIGURA 12 - COMUTAÇÃO DE PACOTES USANDO UMA MATRIZ DE CHAVEAMENTO ANALÓGICA LINEAR.....	27
FIGURA 13 - INVERSOR SIMPLES CMOS. ....	28
FIGURA 14 - ENERGIA DE CHAVEAMENTO $ES (J)$ X ANO. ....	29
FIGURA 15 - MODELO DE REDE FIM A FIM. ....	34
FIGURA 16 - CONSUMO DE ENERGIA DA REDE POR $BIT (J)$ X ANO.....	37

# CAPÍTULO 1: INTRODUÇÃO

Antes de iniciar este capítulo, é importante ressaltar que a escrita das seções 1.1, 2.1 e 2.2 foi compartilhada com o aluno Matheus Poiatti Nogueira [2]. Essa troca de informações foi necessária porque os assuntos são correlacionados e, assim, possuem a mesma motivação de seus estudos. Desse modo, o leitor pode entender o contexto de uma monografia sem precisar ler os dois textos.

As informações da seção seguinte foram baseadas nos artigos [3] e [4], que levam em consideração aspectos de redes “verdes” e eficiência energética.

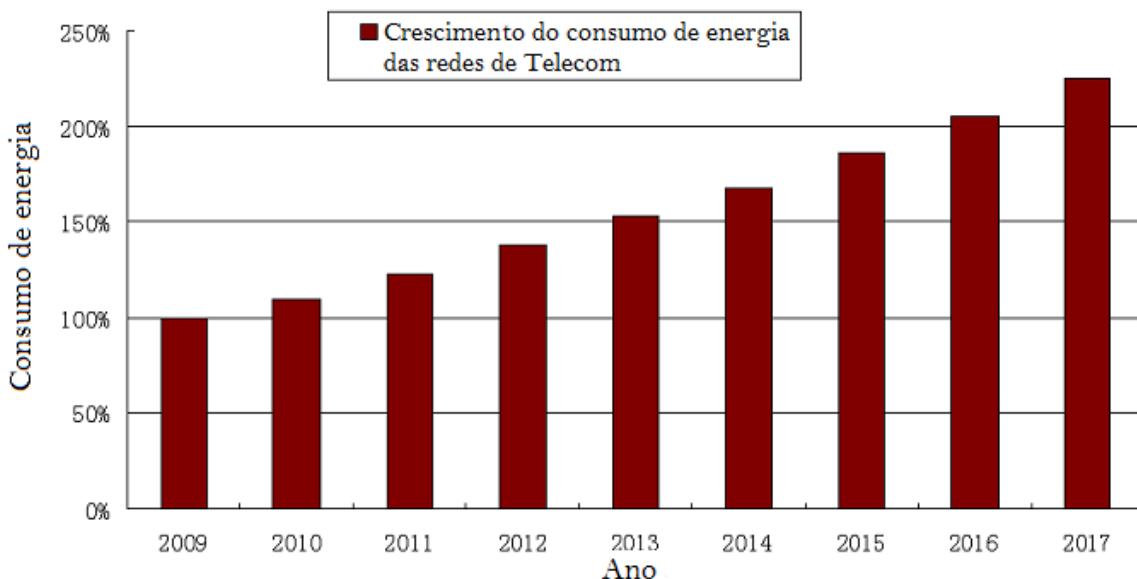
## 1.1. Contextualização e Motivação

A redução no consumo de energia se tornou uma questão chave para as indústrias, seja por motivos econômicos, ambientais, ou de mercado. Essa questão representa uma grande influência entre os fabricantes de eletrônicos e, consequentemente, nos setores da Tecnologia da Informação e Comunicação (TIC), especificamente no campo de redes. Por exemplo, *datacenters* e infraestruturas de redes envolvem máquinas de alto desempenho e alta disponibilidade. Eles, portanto, contam com dispositivos poderosos que requerem o consumo extra de energia (não inerentes às redes) com ar condicionado para manter suas operações funcionando e são organizados em arquiteturas redundantes. Como essas arquiteturas são feitas para suportar altos picos de cargas elas acabam sendo naturalmente subutilizadas, dando margem para economias de energia. Recentemente, vários esforços têm sido focados na redução do consumo desnecessário de energia, conhecido como “greening” dos protocolos e tecnologias de rede.

Antes de tentar reduzir o consumo de energia ou entender por quais meios tal redução pode ser alcançada, é necessário identificar onde os maiores avanços poderiam ser realizados. Tomando como exemplo a Internet, que pode ser segmentada em uma rede principal e vários tipos de redes de acesso. Em cada um desses segmentos, os equipamentos envolvidos e suas funções, seu desempenho esperado e os níveis de consumo de energia são diferentes. Desse modo, é possível esperar que o potencial de avanço em cada um desses segmentos também seja diferente. Em [5] (ano de 2002), foram analisadas as contribuições de consumo de energia de diferentes categorias de equipamentos na Internet. Esses dados indicaram que as redes locais (LAN: *Local Area Network*), por meio de concentradores e comutadores, foram responsáveis por cerca de 80% do consumo total de energia da Internet nessa época. Em 2005, os autores de [6]

estimaram a contribuição relativa das placas de rede (NIC: *Network Interface Cards*) em conjunto com todos os outros elementos da rede e concluíram que elas foram responsáveis por quase metade do consumo total de energia. Mais recentemente, os estudos sugeriram um aumento do consumo do domínio de núcleo da rede (*Core*): por exemplo, em 2009, a Deutsche Telekom [7] previu que, por volta do ano 2017, o consumo de energia do núcleo da rede será igual ao do acesso à rede. Esse mesmo estudo também sugere, para a próxima década, um aumento de 12 vezes no consumo de energia desse núcleo.

A cobertura de serviços TIC no mundo está aumentando rapidamente, então mais componentes de rede estão sendo utilizados. Desse modo, o consumo total de energia dos equipamentos está acompanhando esse crescimento. Em 2009, a fatia consumida por TICs era de 8% de todo o fornecimento de energia elétrica do mundo. Como o tráfego das redes também está aumentando, foi feita uma previsão do consumo de energia relacionado à Telecom para os próximos anos (comparados com o ano de 2009), representado na Figura 1.



**Figura 1 - Consumo de energia (%) x ano, no setor de TIC e com base em 2009 [4].**

Considerando a rápida evolução que ocorre na TIC, os números e estimativas mencionados acima podem ser imprecisos e rapidamente ultrapassados. Como consequência, há a necessidade de uma avaliação permanente do consumo a fim de destacar e atualizar regularmente os alvos mais relevantes para o potencial de economia de energia. No entanto, essa análise requer uma colaboração entre fabricantes de

equipamentos, provedores de serviços de Internet e governos, o que, claramente, não é um processo fácil, e mesmo que os incentivos atuais não sejam tão claros, é possível identificar uma oportunidade de inovação na criação de dispositivos e protocolos mais eficientes e, dessa forma, tomar decisões mais responsáveis (“verdes”).

## **1.2. Objetivos**

Esta é a segunda parte de um estudo baseado na pesquisa do autor Rodney S. Tucker [1] que explora os limites fundamentais de consumo de energia em sistemas e redes ópticas de comunicação. A pesquisa de Tucker é dividida em duas partes, sendo a primeira estudada na monografia do aluno de graduação Matheus Poiatti Nogueira [2], no qual o limite inferior no consumo de energia na camada de transporte é analisado. A camada de transporte envolve os sistemas de transmissão, amplificadores e receptores.

Neste trabalho, a análise será estendida para incluir os limites inferiores em redes ópticas. A camada de rede em questão inclui os mecanismos de chaveamento da rede. A energia de diversos dispositivos de chaveamento será analisada, e com as informações de transporte discutidas em [2], um modelo simples para uma rede global completa será criado e estimado para dois cenários futuros distintos. Esse modelo teórico encontrado será então comparado com os alcançados atualmente na prática, e considerações referentes à distância entre essas duas análises serão discutidas.

## **1.3. Organização do Trabalho**

No capítulo 2 serão descritas as classificações dos domínios de redes de telecomunicações e os principais esforços de padronização de topologias para as redes de telecomunicações. No capítulo 3, será dada uma visão global do estado de eficiência energética de equipamentos atuais de chaveamento e será elaborado um modelo simples para estimar o consumo de energia em uma rede chaveada. No capítulo 4 será explorado o consumo de energia de tecnologias concorrentes de chaveamento incluindo equipamentos ópticos e eletrônicos. No capítulo 5, o modelo do capítulo 3 será utilizado juntamente com os dados do capítulo 4 para estimar o consumo total de energia da rede. E finalmente, o capítulo 6 contemplará algumas estratégias que podem ser empregadas para melhorar a eficiência de energia das redes bem como uma conclusão sobre o que foi estudado.

## CAPÍTULO 2: DOMÍNIOS DE REDE E PESQUISAS ATUAIS

As informações deste capítulo foram baseadas no artigo [4], no que diz respeito aos domínios de rede e esforços de padronização das topologias das redes de telecomunicações.

### 2.1. Classificação dos domínios de rede

As redes de telecomunicações podem ser divididas em três domínios: núcleo (*core*), metro e acesso. O objetivo nessa seção é explicar a diferença entre esses tipos de domínio e citar exemplos de tecnologias utilizadas em cada um deles.

#### 2.1.1. Núcleo

Normalmente referenciada como a infraestrutura de *backbone* de uma rede de telecomunicações, interconecta grandes cidades (como nós de rede) e atinge distâncias em âmbito nacional, continental e até mesmo intercontinental. Esse domínio de rede é tipicamente baseado em um padrão de uma malha interconectada que suporta um grande tráfego nas áreas periféricas da rede (metro e acesso). Portanto, precisa estar equipada com interfaces apropriadas entre os domínios metro e acesso, que são responsáveis por coletar e distribuir o tráfego na rede. Dessa forma, usuários separados por uma longa distância conseguem se comunicar através desse núcleo (*backbone*) de rede.

Nas redes de núcleo a tecnologia óptica é amplamente utilizada como forma de suporte para a infraestrutura básica por banda larga e fornecimento de alta capacidade e escalabilidade. Para controlar essas redes ópticas de forma inteligente, diversos equipamentos e tecnologias foram desenvolvidos. Por exemplo, arquiteturas de redes baseadas em IP sobre SONET/SDH, IP sobre WDM ou IP sobre SONET/SDH sobre WDM têm sido aprimoradas nos últimos 20 anos [8], [9]. Como as redes de núcleo apresentam arquiteturas multicamada, seu consumo de energia deve ser considerado tanto na camada óptica quanto na eletrônica.

#### 2.1.2. Metro

A rede metro é uma parte da rede de telecom que normalmente cobre regiões metropolitanas. Ela conecta equipamentos para a agregação de tráfego dos assinantes e provê conexões diretas com a rede de Núcleo para acesso Internet.

Três tecnologias dominantes nesse tipo de rede são: SONET, anel óptico WDM e Metro Ethernet. Por exemplo, a Metro Ethernet é uma infraestrutura baseada no padrão Ethernet [10] e seus equipamentos básicos envolvem roteadores de borda, gateways banda larga e comutadores Ethernet. A tecnologia de anéis ópticos de WDM também foi explorada devido aos seus benefícios herdados da tecnologia óptica (velocidade e escalabilidade).

### **2.1.3. Acesso**

É a “última milha” entre o CO (*Central Office*) da rede e os usuários finais. Essa porção compreende a maior parte das redes de telecomunicações. Também possui um alto consumo de energia devido à grande quantidade de elementos ativos [11].

As principais tecnologias utilizadas são: xDSL (*Digital Subscriber Line*), CM (*Cable Modem*), redes sem fio e celular, FTTx (*Fiber-to-the-x*) e WOBAN (*Wireless-Optical Broadband Access Network*). Essas tecnologias ainda podem ser classificadas de duas formas: cabeadas e sem fio.

## **2.2. Esforços de Padronização**

A importância da eficiência energética em redes foi reconhecida por uma série de novos grupos de trabalho em organizações internacionais de padronização. Vários deles, como a ITU (*International Telecommunication Union* ou União Internacional de Telecomunicações), IEEE (*Institute of Electrical and Electronic Engineers* ou Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos), ETSI (*European Telecommunication Standard Institute* ou Instituto Europeu de Padronização em Telecomunicações), a TIA (*Telecommunication Industry Association* ou Associação da Indústria de Telecomunicações), ATIS (*Alliance for Telecommunications Industry Solutions* ou Aliança para Soluções de Telecomunicações), ECR (*Energy Consumption Rating* ou Avaliação do Consumo de Energia), TEEER (*Energy Efficiency Requirements for Telecommunications Equipment* ou Normas de Eficiência Energética para Equipamentos de Telecomunicações), entre outros estão trabalhando em novos padrões de eficiência energética nas redes [12]. Eles estão desenvolvendo novos conceitos para as redes verdes (ou *Green Networks*) e suas atividades podem fornecer orientações aos pesquisadores sobre a praticidade de sua pesquisa.

Como parte de uma grande iniciativa em Redes Verdes, a ITU está organizando simpósios sobre a TIC e as Alterações Climáticas [13]. Estes simpósios reúnem importantes especialistas nas áreas, desde tomadores de decisão até engenheiros,

*designers*, planejadores, governantes, legisladores, especialistas em normas, e outros. Os tópicos apresentados e discutidos incluem: a adaptação e mitigação dos efeitos das mudanças climáticas no setor da TIC e em outros setores; *frameworks* de TIC com políticas "verdes" e o uso de TIC na ciência da mudança climática e em situações de emergência. O Setor de Padronização de Telecomunicações da ITU anunciou também a criação do 15º grupo de estudo, que pesquisará sobre técnicas de conservação de energia. As tecnologias consideradas na lista incluem as camadas de transporte e rede em comunicações ópticas e tecnologias de rede de acesso, como DSL e PON. Em conjunto, estas tecnologias representam um consumo de energia significativo em todo o mundo.

O IEEE está desenvolvendo um padrão em Energia Eficiente com Ethernet (IEEE P802.3az) [14]. Seus objetivos são: 1) definição de um mecanismo para redução do consumo de energia durante períodos de baixa utilização do *link* para os PHYs (*Physical Layer Protocol* ou protocolo de camada física), 2) definição de um protocolo para coordenação da transição entre os níveis de consumo de energia, de modo que não deixe o *link* inoperante ou provoque queda de pacotes, e 3) definição de um PHY de 10 Mb/s com um baixo requisito de distância de transmissão, de modo que o consumo de energia possa ser reduzido.

A agenda "Verde" é um dos principais temas estratégicos do ETSI [15]. Este esforço vai implementar as ISO 14001:2004 e 14004:2004, que são normas de gestão ambiental. Além disso, a agenda inclui Engenharia Ambiental, que consiste em 1) item de trabalho "DTR/EE-00002": redução do consumo de energia em equipamentos de telecomunicações e em infraestrutura associada, 2) item de trabalho "DTR/EE-00004": uso de fontes alternativas de energia em instalações de telecomunicações, 3) item de trabalho "DTS/EE-00005": consumo de energia em equipamentos de Telecom em redes de banda larga, 4) item de trabalho "DTS/EE-00006": considerações ambientais para o equipamento instalado no lado de fora, e 5) item de trabalho "DTS/EE-00007": eficiência energética de equipamentos de acesso à rede sem fio. Além disso, o item de trabalho "DTR/ATTM-06002" da ETSI ATTM (*Access, Terminals, Transmission and Multiplexing* ou Acesso, Terminais, transmissão e multiplexação), que trata de otimização de energia de transceptores xDSL (*Digital Subscription Line* ou Linha Digital de Assinatura), está em processo de padronização. No item de trabalho "DTS/EE-00005", a ETSI lidera o esforço para definição de metas de consumo de energia e métodos para medição tanto para equipamentos de banda larga com fio, quanto para equipamentos sem fio. Na primeira

fase, DSL, ISDN (*Integrated Services Digital Network* ou Redes Digitais com Serviços Integrados), já foram considerados. Na segunda fase, o consumo de energia para o WiMAX, PLC (*Power Line Communication* ou Comunicação via Linhas Elétricas) será investigado [15].

A TIA começou uma "Iniciativa Verde" em 2008, chamada EIATRACK [16]. Ela oferece às empresas uma maneira de criar estratégias para seu crescimento futuro e iniciativas ambientalmente conscientes em novos mercados. Suas principais questões de conformidade de produtos estão relacionadas ao recolhimento de produtos, baterias, substâncias restritas, projetos voltados para o meio ambiente, e questões sobre embalagens. Mais de 1.500 peças com legislação específica são controladas, desde a proposta até a implementação, cobrindo todas as principais regiões da Europa, Ásia-Pacífico, América do Norte e América do Sul. Ela tem um conteúdo preciso e atualizado, fornecido por uma ampla gama de especialistas técnicos e legais internacionais, e também especialistas em EEE (*Electrical and Electronic Equipment* ou Equipamentos Elétricos e Eletrônicos) e RoHS (*Restriction of the use of certain Hazardous Substances* ou Restrição da utilização de determinadas Substâncias Perigosas) na Europa e em outras jurisdições.

A ATIS criou um comitê nomeado NIPP (*Network Interface, Power and Protection Committee* ou Comissão de Interface de Rede, Energia e de Proteção), que está trabalhando no desenvolvimento de normas e relatórios técnicos que contemplam interfaces de rede, consumo de potência, padronização elétrica e proteção física [17]. As atividades "verdes" da comissão NIPP são focadas em: 1) a elaboração de normas que podem ser utilizadas por prestadores de serviços para avaliar as necessidades de energia de equipamentos de telecomunicações, 2) RoHS em equipamentos eletrônicos, e 3) investigar métodos para redução do consumo de energia dos modems DSL tanto nas redes tronco como nas redes de acesso [12]. O NIPP também estabeleceu a subcomissão TEE (*Telecommunications Energy Efficiency* ou Eficiência Energética em Telecomunicações), que desenvolve e recomenda normas e relatórios técnicos relacionados com a eficiência energética dos equipamentos de telecomunicações. Eles estão fazendo esforços para definição de métricas de eficiência energética, técnicas de medição, bem como as novas tecnologias e práticas operacionais para componentes de telecomunicações, sistemas e instalações [18]. Em resumo, assim como as organizações de padronização listadas acima, a ATIS também está focando em tecnologias "verdes", tanto na camada física quanto na camada de rede.

O conceito de ECR (*Energy Consumption Rating* ou Classificação do Consumo de Energia) também foi iniciado recentemente. O ECR é definido para medir a eficiência energética dos equipamentos de rede, que é expressa em Watts/Gbps. Como uma métrica primária, o objetivo do ECR é avaliar a relação entre o consumo de energia e a largura de banda de transmissão. Novos critérios também são usados para definir os aspectos práticos da eficiência de energia para a indústria de redes [19].

A Verizon alcançou a Quantificação Métrica da TEEER em eficiência energética a partir da iniciativa VZ.TPR.9205. O objetivo deste programa é estabelecer requisitos técnicos de compra da Verizon e fomentar o desenvolvimento de equipamentos de telecomunicações energeticamente eficientes, reduzindo, assim, as emissões gases do efeito estufa. A TEEER é definida como uma média do consumo de energia de um equipamento em diferentes níveis de uso. Essa métrica é aplicada a todos os novos equipamentos adquiridos pela Verizon após 1º de Janeiro de 2009 [20].

## CAPÍTULO 3: ANÁLISE E MODELAGEM

### 3.1. Análise Atual e Projeções do Consumo das Redes

As redes metro, núcleo (*core*) e acesso dominam o consumo de energia das infraestruturas atuais de telecomunicações [21], [22]. A Figura 2 mostra a energia por *bit* de uma série de elementos de rede incluindo roteadores, comutadores Ethernet e uma variedade de componentes do sistema de transmissão [22]. Essas informações foram coletadas das especificações de diversos fabricantes. Informações sobre um fabricante em específico é encontrado em [23]. De acordo com a Figura 2 um roteador comum de alta tecnologia (ano de 2010) consome cerca de  $20 \text{ nJ/b}$ , enquanto comutadores Ethernet consomem menos de  $10 \text{ nJ/b}$  [21] e transceptores que utilizam a tecnologia “Pacote sobre SONET” (ou “IP sobre SDH sobre WDM”) consomem aproximadamente  $0,5 \text{ nJ/b}$ . É esperado que transceptores de circuitos fotônicos integrados (PIC: *photonic integrated circuits*) [24] consumam abaixo de  $0,5 \text{ nJ/b}$ .

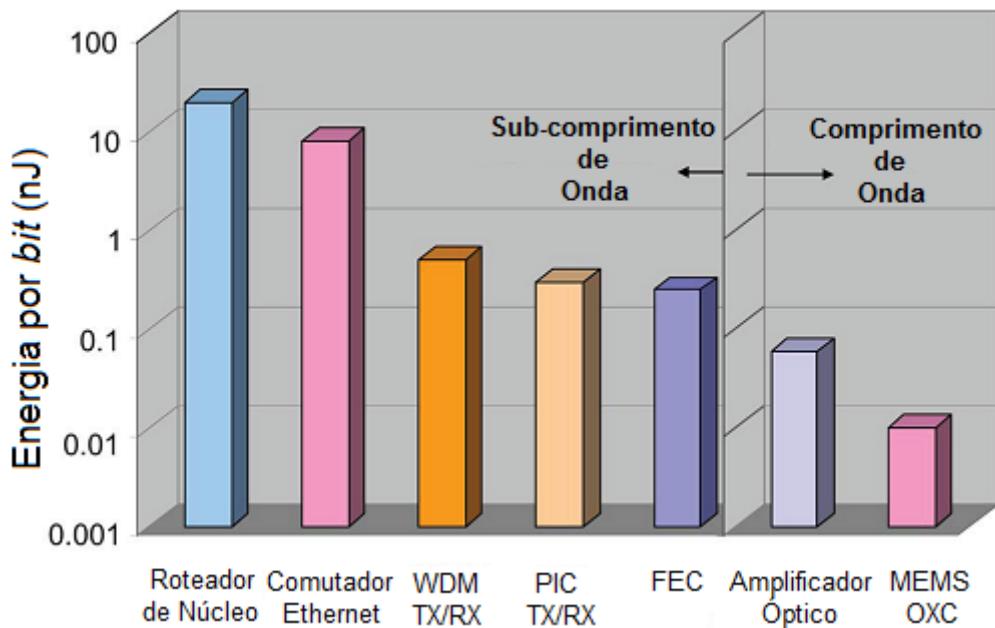


Figura 2 - Energia por *bit* (nJ) x dispositivos de chaveamento (2010) [1].

Dados de um *chip* de correção antecipada de erros (FEC: *forward-error-correction*) [25] também são incluídos na Figura 2, com um consumo de energia de  $250 \text{ pJ/b}$ . Muitos dos dispositivos mencionados oferecem potencial de *grooming* de sub-comprimento de onda (períodos menores do que o comprimento de onda). *Grooming* é uma técnica que tem como objetivo prover melhor utilização dos comprimentos de onda,

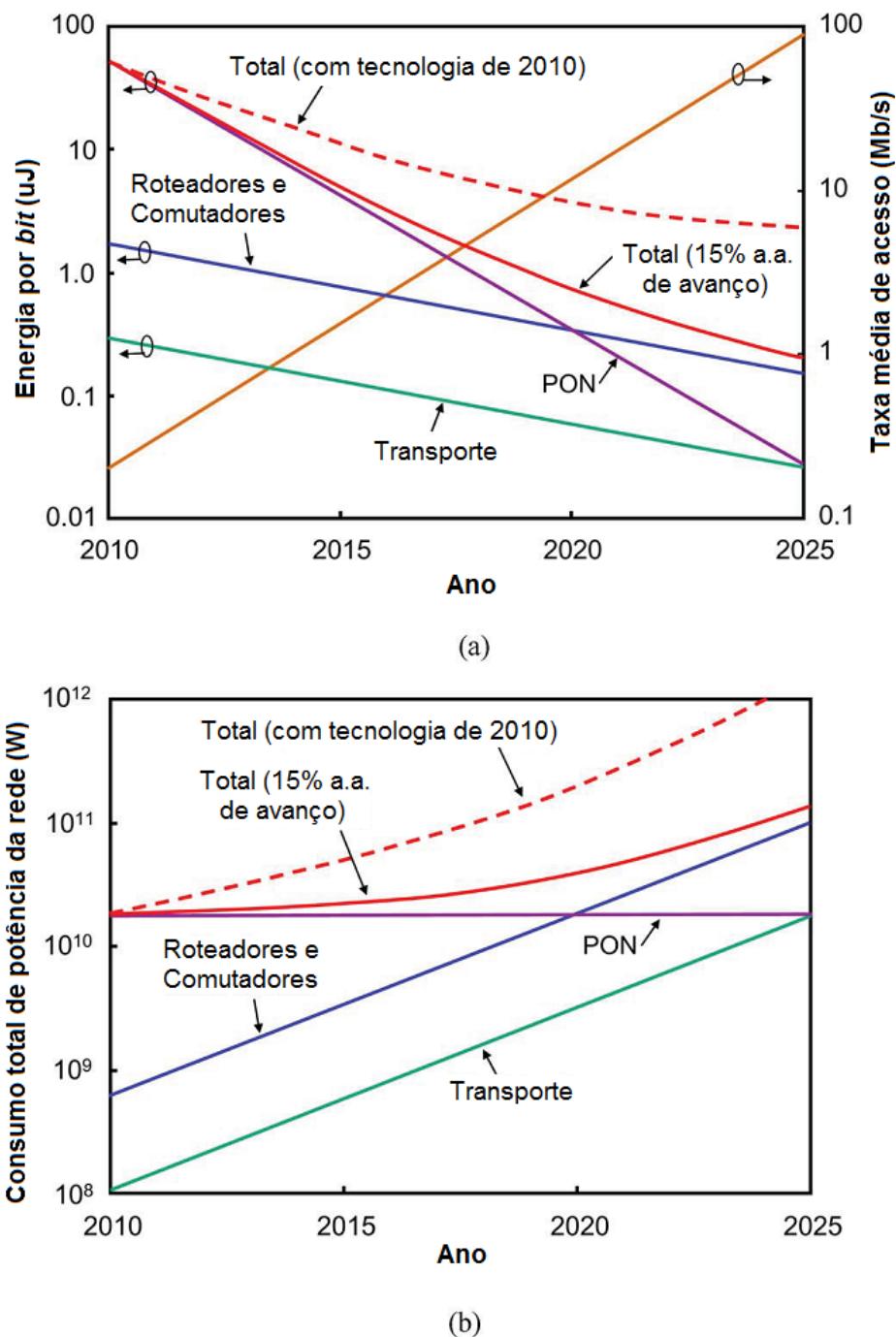
de forma individual, fazendo com que várias requisições possam ser atendidas utilizando o mesmo canal de comunicação. Amplificadores ópticos operam no nível de banda de comprimento de onda (*waveband*), porém consomem menos energia por *bit* do que outros dispositivos e podem lidar simultaneamente com múltiplos comprimentos de onda. Como indicado na Figura 2, um sistema óptico microeletromecânico (MEMS: *micro-electro-mechanical system*) consome menos de  $10 \text{ pJ/b}$ . No entanto, os comutadores MEMS são normalmente restritos às aplicações de comutação por circuito porque sua velocidade de chaveamento é muito lenta para *grooming* de sub-comprimento de onda e multiplexação [26].

As novas gerações de tecnologia trarão consigo atualizações e expansões na capacidade das redes. Essas novas tecnologias incorporarão avanços na eficiência energética devido a atualizações nos *layouts* e novas gerações de componentes ópticos e eletrônicos de baixa energia, como os circuitos semicondutores metal-óxido complementado (CMOS: *complementary metal-oxide-semiconductor*). A taxa de aumento da eficiência energética de roteadores (até 2006) era de aproximadamente 20% ao ano (a.a.) [27]. Essa alta taxa teve como principal motivo os ganhos de eficiência energética na tecnologia CMOS e do desenho de circuitos mais eficientes. Atualmente, a taxa de avanço está em torno de 15% a.a [28] e modelos recentes [23] prevêem uma taxa de 13% a.a. entre 2010 e 2020.

A energia consumida por um *bit* de dado enquanto propaga pela Internet pode ser estimada pela quantidade de dispositivos (comutadores, amplificadores, transceptores, etc.) pelos quais ele atravessa somado à sua própria contribuição no consumo de energia [21]. A Figura 3(a) mostra a energia fim a fim, em função do tempo, para um *bit* de dado que percorre uma rede óptica passiva (PON: *passive optical network*) na camada de acesso e com uma média de saltos igual a 20 (quantidade de dispositivos pelos quais o *bit* percorre) [21]. A taxa média de acesso por usuário é de  $200 \text{ kb/s}$  no ano de 2010 e assume-se também que essa taxa tenha um crescimento de 50% a.a. A razão de excesso de demanda da rede (*oversubscription*) é 25. Portanto, o pico de acesso por usuário em 2010 foi de  $0,2 \times 25 = 5 \text{ Mb/s}$ . No eixo vertical direito da Figura 3(a) é representada a taxa média de acesso por usuário, ela cresce de  $200 \text{ kb/s}$  em 2010 para quase  $100 \text{ Mb/s}$  em 2025.

Partindo dos dados da Figura 3, é possível afirmar que todos os equipamentos possuem uma taxa de crescimento em sua eficiência energética de aproximadamente 15% a.a. No entanto essa é uma estimativa otimista, pois mesmo que todos os

equipamentos evoluam a essa taxa, é improvável que todos eles sejam substituídos anualmente dentro das redes. Além disso, essas curvas são traçadas tendo como base a capacidade da rede ser completamente utilizada. Se os elementos de rede forem subutilizados, esse consumo de energia por *bit* cresce proporcionalmente.



**Figura 3 - (a) Energia por *bit* ( $\mu J$ ) x ano. (b) Consumo total de potência na rede (W) x ano [1].**

Na Figura 3(a) a energia por *bit* é traçada em uma janela de tempo que vai de 2010 até 2025. Foram utilizados modelos simples de crescimento exponencial, o que torna difícil uma estimativa correta para uma data futura distante (2025). No entanto, ela serve para entender um pouco melhor quais serão as tendências gerais nos próximos anos.

A energia total por *bit* da Figura 3(a) decresce de quase duas ordens de grandeza na janela de 2010 a 2020. Isso pode ser explicado parcialmente devido ao aumento da eficiência energética dos *modems PON* a taxas de acesso mais altas, que ocorre porque a infraestrutura PON consome uma potência quase constante, independentemente da taxa de acesso [29], e parcialmente devido à taxa de crescimento na eficiência energética dos equipamentos de 15% a.a. A linha tracejada na Figura 3(a) representa o consumo total de energia por *bit* para uma rede construída utilizando equipamentos com a tecnologia de 2010 (ou seja, considerando uma taxa de avanço na eficiência energética a partir dessa data de 0% a.a.). Comparando essas duas curvas, fica claro que o impacto desses 15% a.a. é substancial: sem qualquer tipo de avanço, a energia total em 2020 seria da ordem de  $4 \mu J/b$ , porém essa energia total cairia para menos de  $1 \mu J/b$  em 2020 levando em consideração essa taxa de 15% a.a.

O consumo total de potência de uma rede global contendo 1,8 bilhão de usuários no ano de 2010 é representado na Figura 3(b). A taxa de crescimento de usuários nessa rede é de 10% a.a. [30]. Os demais parâmetros são idênticos ao da Figura 3(a). Analisando as duas figuras em conjunto percebe-se que o consumo de energia no período de 2010 a 2020 é dominado pelas redes de acesso e após 2020 pelos roteadores, uma expectativa semelhante à já citada no capítulo 1. Portanto, o desenvolvimento de componentes PON de alta eficiência será de suma importância para o gerenciamento do consumo de energia das redes, especialmente nos próximos dez anos.

No período de 2010 a 2015 o consumo total de potência cresce lentamente, mesmo com o aumento na taxa de acesso e do número de usuários. Esse consumo (curva cheia) é de cerca de  $20 GW$ , o que representa cerca de 1% do fornecimento global de eletricidade no ano de 2010 ( $2 TW$ ). Em 2020, esse consumo chegará a  $40 GW$ , e em 2025  $0,13 TW$ , ou seja, 7% do fornecimento global de eletricidade de 2010.

A curva tracejada da Figura 3(b) representa o consumo total de potência da rede global assumindo que a taxa de crescimento da eficiência energética seja de 0% a.a., ao

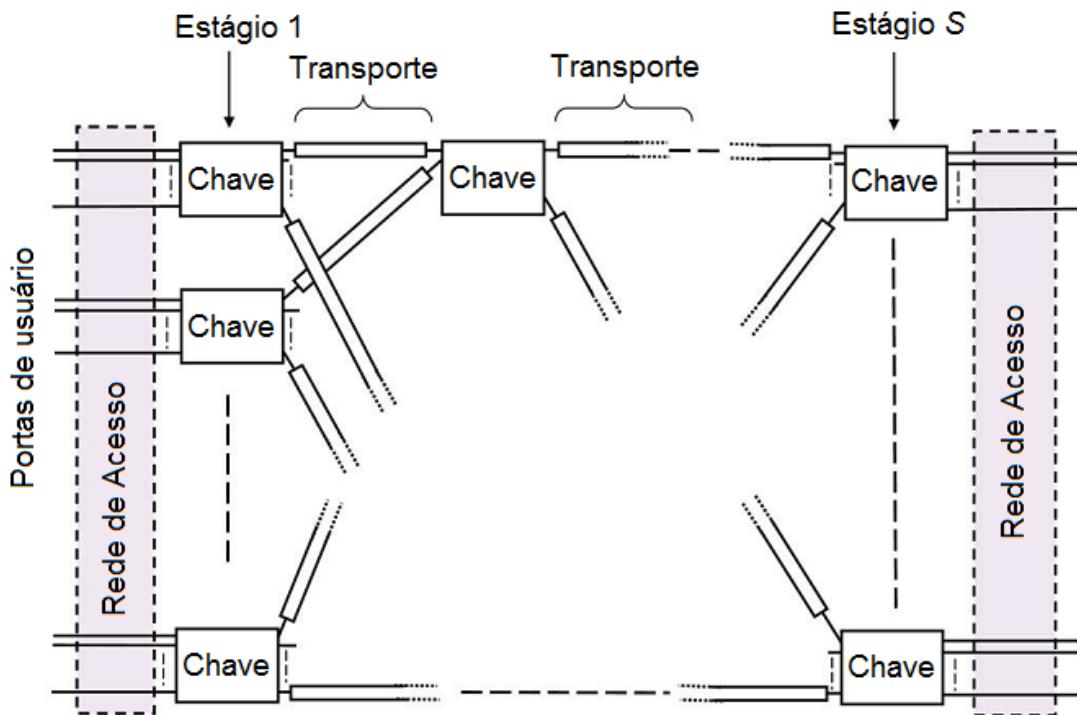
contrário dos 15% a.a. previsto e representado pelas linhas cheias da mesma figura. Se não existir nenhum avanço tecnológico na eficiência energética com o tempo, o consumo total de potência na rede pode chegar a  $0,2\text{ TW}$  em 2020 e  $1,5\text{ TW}$  em 2025, ou seja, algo em torno de 75% do fornecimento global de eletricidade em 2010. Pela mesma razão já explicitada anteriormente, é preciso tomar cuidado com essas projeções futuras, no entanto fica claro que os avanços tecnológicos devem continuar existindo.

### 3.2. Modelo de Energia de Rede

Nessa seção as atenções são voltadas para estimativas do limite inferior de energia de uma rede inteiramente interconectada, ou seja, levando em consideração tanto os sistemas de transporte [2] quanto o chaveamento de dados. Atualmente não existe uma teoria comprehensiva para o consumo de energia em uma rede totalmente interconectada como essa. Será feita então uma análise simples para esse cálculo do limite inferior.

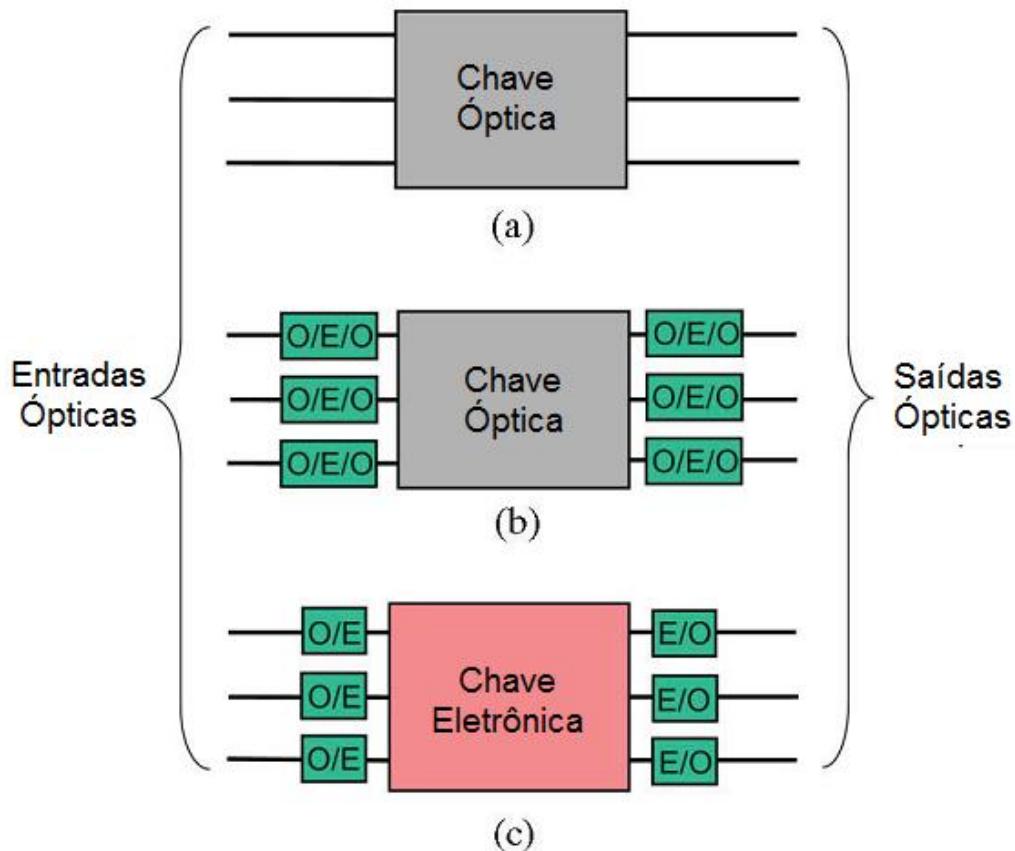
O principal objetivo das redes de telecomunicações é prover um mecanismo fim a fim para que dados de qualquer dispositivo ou usuário conectado à rede possam alcançar qualquer outro dispositivo também conectado a essa mesma rede. Para determinar o limite inferior do consumo de energia, deve-se calcular a energia gasta por *bit* enquanto o ele atravessa essa rede de ponta a ponta. Para isso, é necessário determinar o consumo conforme cada *bit* passa por cada mecanismo de chaveamento e na interconexão dos sistemas de transporte entre cada um desses mecanismos. Na seção IV esse consumo é estimado para dois exemplos: 1) uma rede global com 10 bilhões de dispositivos conectados, com seus usuários operando a taxas de acesso de  $10\text{ Mb/s}$ , e 2) uma rede global futura com 100 bilhões de dispositivos e taxas de operação de  $1\text{ Gb/s}$ .

Para manter essa análise simples é utilizada uma arquitetura de rede de multi-estágios Clos (*rearrangeably nonblocking multi-stage*) para interconexão de usuários em uma rede. Essa é modelada como um conjunto “mínimo” de dispositivos de chaveamento [31]. Um esquemático dessa arquitetura é mostrado na Figura 4. Os usuários estão conectados através de uma rede de acesso a um estágio de chaves multi-portas, que por sua vez estão conectados por um sistema de transporte óptico para os próximos estágios de comutadores. Qualquer *bit* de dado em uma conexão fim a fim nesse modelo atravessa  $S$  estágios de chaves,  $S-1$  estágios no núcleo de transportes ópticos, e dois estágios de rede de acesso.



**Figura 4 - Modelo simplificado de uma rede global [1].**

As chaves representadas na Figura 4 podem usar tanto tecnologia óptica quanto eletrônica. Para determinar o consumo total de energia, é necessário não só determinar o consumo dos blocos funcionais chaves na Figura 4 como também considerar o consumo de energia nas interfaces entre cada porta das chaves e o meio de transporte. A Figura 5 mostra três possíveis configurações para essa interface, sendo na Figura 5(a) uma chave inteiramente óptica, sem qualquer eletrônico no caminho do dado, logo, sem a necessidade de um transmissor ou receptor óptico na interface com o meio de transporte. Na Figura 5(b) é representada uma *fabric* (topologia na qual um nó da rede é conectado por uma ou mais chaves) de chaves ópticas, embarcada em uma plataforma eletrônica. Nela, as caixas marcadas com “O/E/O” representam conversores ópticos para elétricos (O/E) combinados com conversores elétricos para ópticos (E/O). Esse arranjo permite alguns processos eletrônicos intermediários entre o comutador e o meio de transporte. Um exemplo seria um comutador eletrônico de pacotes que utiliza uma *fabric* de chaves ópticas [26]. E finalmente a Figura 5(c) representa um mecanismo de comutação inteiramente eletrônico como encontrado nos roteadores IP modernos ou em comutadores Ethernet.



**Figura 5 – (a) Chave óptica. (b) Chave óptica em plataforma eletrônica. (c) Chave inteiramente eletrônica [1].**

Alguns exemplos de possíveis interfaces entre sinais ópticos e elétricos na entrada do comutador optoletrônico da Figura 5(c) são representados na Figura 6. Essa interface pode incluir alguma forma de demultiplexação por divisão de tempo (TDM: *time division multiplexing*) para diminuir a taxa de *bits* no transporte para um valor que atenda necessidades específicas que alguns dispositivos possam requerer. Para realizar essa demultiplexação (e correspondente multiplexação na porta de saída) inúmeras técnicas podem ser utilizadas, como os TDMs eletrônicos (Figura 6(a)), ópticos (Figura 6(b)) [32], ou um subproduto de alguns formatos de modulação (e demodulação) avançados como a multiplexação por divisão de frequência ortogonal (OFDM: *orthogonal frequency division multiplexing*) [33], que está ilustrado na Figura 6(c).

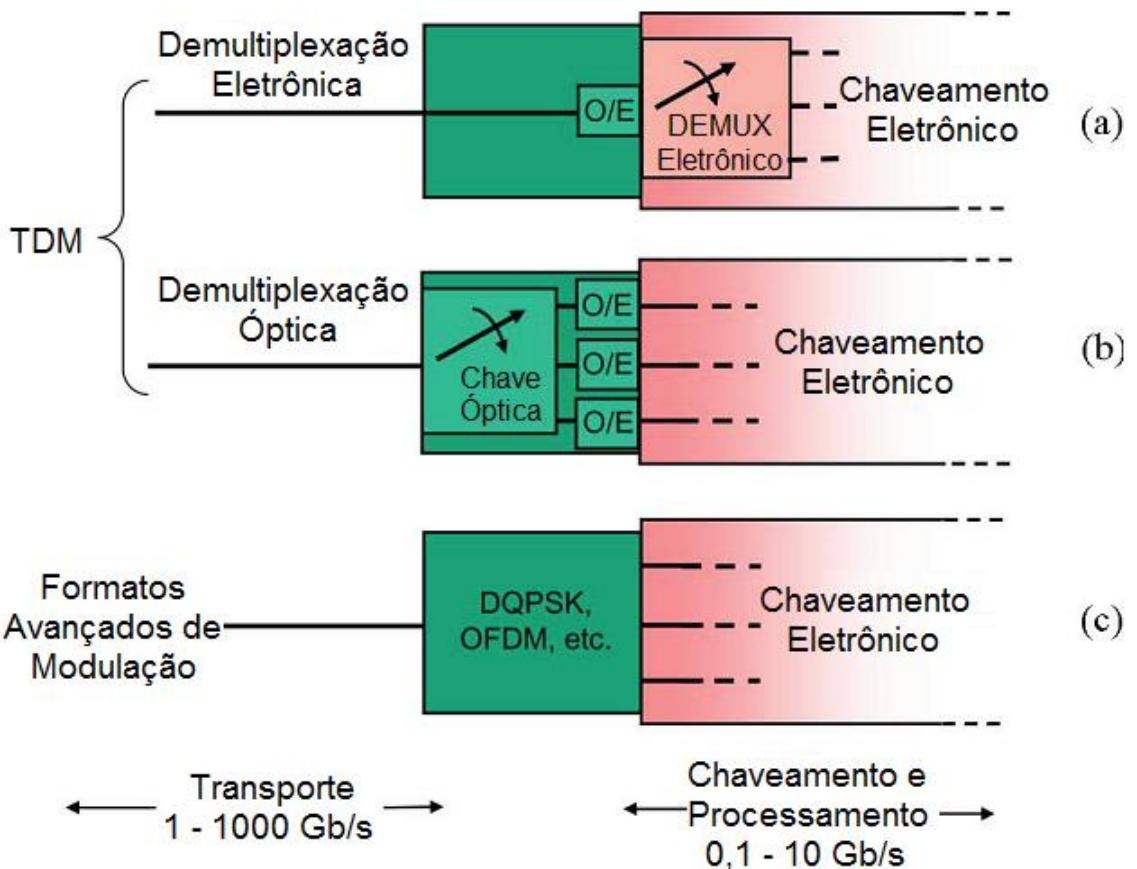


Figura 6 - Opções de entrada para uma chave O/E/O [1].

### 3.3. Consumo de Energia Fim a Fim

O objetivo então é determinar a energia total (fim a fim) por bit  $E_{net}$  na rede da Figura 4.  $E_{net}$  é a energia consumida por cada bit em cada estágio da comutação e em cada sistema de transporte. Assim,  $E_{net}$  é dado por:

$$E_{net} = \sum_{i=1}^s E_{switch,i} + \sum_{i=1}^{s-1} E_{core-transport,i} + E_{access-transport} \quad (1)$$

Nessa equação,  $E_{switch,i}$  é a energia por bit no estágio  $i$  de chaveamento,  $E_{core-transport,i}$  é a energia por bit em um sistema de transporte na saída de uma chave no estágio  $i$  da rede da Figura 4,  $E_{access-transport}$  é o transporte de duas vias da energia por bit na rede de acesso (ou seja, dois caminhos de acesso de via única) e  $S$  é o número de estágios da comutação. Nessa equação, as energias  $E_{switch,i}$  e  $E_{transport,i}$  incluem termos que levam em conta a configuração particular da interface entre os comutadores e os sistemas de transporte, como mostrado na Figura 5. Por exemplo, se a matriz de

comutação é inteiramente óptica e não existem, portanto, conversores O/E ou E/O nas portas de comutação, o termo  $E_{core-transport,i}$  dos sistemas de transporte analisados em [2] não deverá contemplar a energia de conversores.

## CAPÍTULO 4: ANÁLISE DE EQUIPAMENTOS DE CHAVEAMENTO

Neste capítulo é analisado o consumo de energia de dispositivos individuais de chaveamento adequados para comutação de pacotes e outras técnicas de chaveamento que realizam *grooming* do tráfego em nível de sub-comprimento de onda (ou seja, em um nível *bit a bit* ou pacote a pacote). A partir dessas informações, o consumo de energia das *fabrics* de comutação multi-portas para comutação por pacotes e outras comutações de alta velocidade será estimado.

O principal objetivo neste capítulo é desenvolver estimativas da energia  $E_{switch,i}$  da equação (1) para uma variedade de tecnologias de dispositivos de alta velocidade. Mais a frente, no capítulo 5, é feita uma combinação dessa energia com as estimativas de  $E_{transport,j}$  da análise feita em [2] e obtida a estimativa total da energia por *bit* ( $E_{net}$ ) utilizando a equação (1). Isso possibilitará a determinação de como a tecnologia dos dispositivos influencia o consumo total de energia.

Na Figura 7 um dispositivo ou circuito de comutação com  $j$  portas de sinal de entrada e  $k$  portas de sinal de saída é mostrado. As portas de entrada e saída podem ser tanto ópticas quanto elétricas. A chave é alimentada com uma fonte (elétrica ou óptica) e a operação de comutação é feita por um controle de entrada (elétrico ou óptico). Em geral as portas de entrada, a fonte e a portas de controle recebem energia após algum dado período (tipicamente um período de *bit* ou um período de comutação) e as portas de saída entregam energia nesse mesmo período. As energias individuais são definidas na Figura 7 [1].

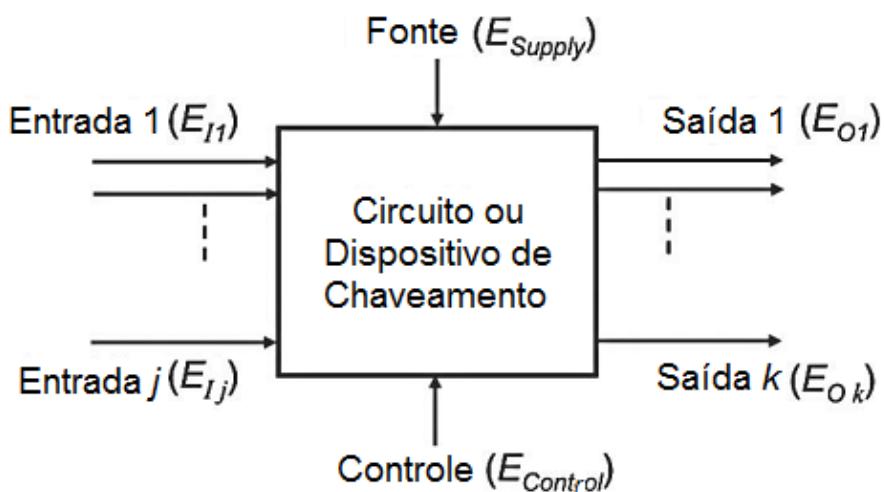


Figura 7 - Energias de dispositivos e circuitos de chaveamento [1].

A energia total  $E_{total}$  por unidade de tempo, consumida pela chave da Figura 7 [34] é dada por:

$$E_{Total} = \sum_{i=1}^j E_{Ii} + E_{Supply} + E_{Control} - \sum_{i=1}^k E_{Oi} \quad (2)$$

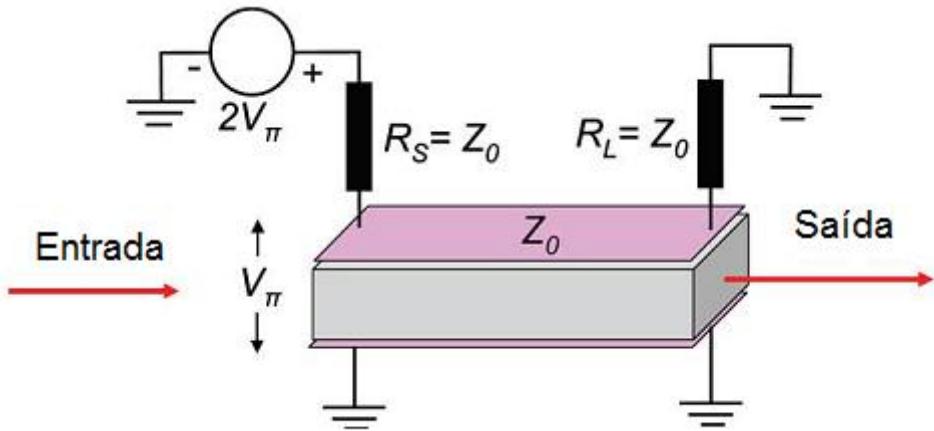
A partir de (2) pode-se perceber que todas as energias de entrada contribuem para o consumo total de energia da chave. Muitas vezes esse ponto não é mencionado apesar de parecer óbvio. A energia da fonte  $E_{Supply}$  é normalmente ignorada, no entanto esse termo pode dominar a energia total.

Nesse capítulo, os termos de energia de (2) são considerados para diversos tipos de dispositivos de comutação ópticos e eletrônicos. Esses dispositivos são divididos em duas classes distintas, sendo elas: Comutadores lineares analógicos e Comutadores digitais. Comutadores lineares analógicos passam o sinal da entrada para a saída apropriada sem a necessidade de se alterar a forma de onda do sinal. Para os lineares, as propriedades dos dispositivos não possuem dependência do nível de sinal óptico na entrada, já para os digitais, eles operam no nível de *bit* e geralmente incorporam dispositivos não lineares, como dispositivos lógicos.

## 4.1. Comutadores Lineares Analógicos

### 4.1.1. Dispositivos Eletro-ópticos

O modulador de fase eletro-óptico de ondas viajantes (*traveling-wave*) (E-O) é um dispositivo de comutação linear analógica. O circuito elétrico desse dispositivo está representado na Figura 8. Ele forma a base para diversos componentes ópticos, como o interferômetro de Mach-Zender (IMZ) [35] e outros dispositivos mais complexos de chaveamento [36]. O campo elétrico entre os dois condutores de uma linha de transmissão, com uma impedância característica  $Z_0 = 50\Omega$  e terminações casadas ( $R_S$  e  $R_L$ ), controla o índice de refração em um guia de onda óptico, usando um material como o niobato de lítio ou fosforeto de índio, ou na região de depleção de um diodo reverso de silício. A tensão de comutação é  $V_\pi$ .



**Figura 8 - Dispositivo eletro-óptico de ondas viajantes [1].**

Para o modulador de ondas viajantes com terminação resistiva da Figura 8, a energia  $E_{Control-R}$  associada à função de controle da chave é dada por:

$$E_{Control-R} = \frac{\tau_s V_\pi^2}{Z_0} \quad (3)$$

Na equação (3),  $\tau_s$  é o período no qual a energia é medida. Para um dispositivo com uma tensão de chaveamento de 3 V e uma taxa de chaveamento de 100 GHz,  $E_{Control-R} = 1,8 \text{ pJ}$ . A uma taxa de 1 GHz,  $E_{Control-R} = 180 \text{ pJ}$ . Nesse caso, um adicional de 180 pJ é dissipado na resistência da fonte,  $R_S$ .

Se o período de chaveamento for muito maior que o tempo de propagação do controle de tensão na linha de transmissão, as reflexões das terminações não são problemas e nesse caso, a terminação de  $50 \Omega$  pode ser eliminada [37]. Sob essas condições, a impedância do dispositivo é capacitiva e a energia de controle  $E_{Control-C}$  é dada por:

$$E_{Control-C} = \frac{1}{2} C V_\pi^2 \quad (4)$$

Para velocidades baixas de chaveamento, a equação (4) pode ser reescrita como [37]:

$$E_{Control-C} = \frac{\tau_{prop} V_\pi^2}{Z_0} \quad (5)$$

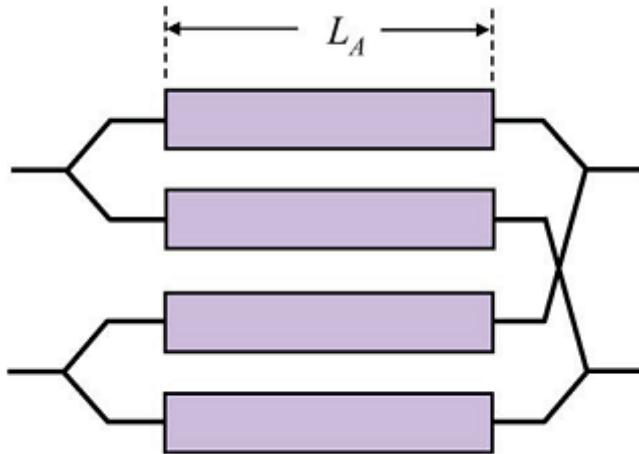
Nessa nova equação,  $\tau_{prop}$  é o tempo de propagação do sinal de controle na linha de transmissão. Portanto, se  $\tau_s \gg \tau_{prop}$  então  $E_{Control-C} \ll E_{Control-R}$ . Além disso, uma linha de transmissão sem terminação garante o menor consumo de energia possível. Por exemplo, se o tempo de propagação na linha de transmissão é de  $1\text{ ns}$  e o dispositivo é operado sem uma terminação e com um período de chaveamento de  $\tau_s = 100\text{ ns}$ , então o período de energia por chaveamento deverá ser  $E_{Control-C} = 180\text{ pJ}$ . Para esse mesmo período  $E_{Control-R} = 1,8\text{ nJ}$ .

Uma contribuição que muitas vezes é desprezada (na literatura) no consumo de energia de uma comutação óptica analógica é a atenuação. Para um comutador óptico analógico com uma perda de entrada-para-saída de  $3\text{ dB}$ , se o nível do sinal óptico de entrada é  $2\text{ mW}$ , a potência óptica perdida no comutador é  $1\text{ mW}$ . Se  $\tau_s = 100\text{ ns}$ , a energia por ciclo de chaveamento seria  $100\text{ pJ}$ , que possui uma ordem de grandeza semelhante ao  $E_{Control-C}$  ( $180\text{ pJ}$ ).

#### 4.1.2. Matrizes de Portas SOA

Amplificadores ópticos semicondutores (SOAs: *semiconductors optical amplifiers*) são dispositivos de chaveamento óptico que possuem altas velocidades de chaveamento ( $\sim 1\text{ ns}$ ) e a característica de alcançar uma alta razão de extinção (mudança ON/OFF) [38], [39]. As matrizes de portas SOA são bases potenciais para grandes matrizes de comutação cruzada com velocidades de chaveamento suficientemente grandes para uso em comutação de pacotes ópticos e em rajadas [40], [41].

Um esquemático básico de uma matriz SOA  $2 \times 2$  (empregando 4 SOAs), cada uma com comprimento  $L_A$  é representado na Figura 9. A partir dessa estrutura, muitas outras matrizes maiores podem se montadas [38], [42]. Quando um dispositivo SOA tende para seu estado ON, seu ganho sobrepuja as perdas nos divisores e combinadores (mostrados como junções de guias de ondas na Figura 9) como também outras perdas de guia de onda no sistema. Em contrapartida, para seu estado OFF (ou seja, tende a zero), seu sinal é bloqueado para aquele caminho. A razão de extinção entre os estados de ON e OFF é um parâmetro muito importante em grandes matrizes de chaveamento [38]. Tipicamente, o valor requerido é de pelo menos  $50\text{ dB}$ .



**Figura 9 - Modelo simples de uma matriz de portas SOA [1].**

Quando um dispositivo é despolarizado (*unbiased*), ele necessita de uma atenuação intrínseca maior para conseguir uma razão de extinção mais elevada [39]. Essa atenuação é relativamente fácil de ser alcançada na prática, porém significa a necessidade de uma grande corrente tendendo ao nível ON [38]. Essa razão de extinção pode ser ignorada em pequenas matrizes de chaveamento, no entanto, quando se analisa matrizes maiores, ela pode ter um grande impacto.

A atenuação do amplificador sob condições neutras depende das perdas do guia de onda, do coeficiente (neutro) de absorção material da região ativa e do comprimento do dispositivo. O ganho  $G$  de cada SOA na Figura 9 pode ser escrito como [1]:

$$G(N) = e^{(\Gamma g(N) - \alpha)L_A} \quad (6)$$

Nessa equação  $g$  é o ganho material,  $N$  é a densidade da portadora na região ativa,  $\Gamma$  é o fator de confinamento, e  $\alpha$  é a perda de guia de onda no amplificador. A razão de extinção (*ER*) é a taxa do ganho de nível ON,  $G_{ON}$  (onde  $N = N_{ON}$ ), para o ganho de nível OFF,  $G_{OFF}$  (onde  $N = 0$ ).

$$ER = \frac{G(N_{ON})}{G(0)} = \frac{G_{ON}}{G_{OFF}} \quad (7)$$

Das equações (6) e (7) é possível determinar o comprimento do dispositivo necessário para alcançar a razão de extinção desejada:

$$L_A = \frac{\ln (ER/G_{ON})}{\alpha - \Gamma g(0)} \quad (8)$$

Analizando essa nova equação, para  $ER = 10^5$  (50 dB),  $G_{ON} = 6$  dB e  $\Gamma g(0) - \alpha = 10^4 m^{-1}$ , o comprimento requerido é  $L_A = 1,0$  mm. Se for possível relaxar a razão de extinção para 30 dB, o comprimento passa a ser de 0,6 mm. Ainda, se o comprimento do dispositivo for 0,2 mm, a razão de extinção cai para 30 (15 dB).

Existe a necessidade de bombear o dispositivo com uma corrente de cerca de 200 mA para atingir um ganho de nível ON razoável em dispositivos SOAs práticos (com comprimento de cerca de 1 mm) [39]. Portanto, o consumo de potência do nível ON,  $P_{SOA}$ , é em torno de 400 mW para um dispositivo com uma tensão de polarização direta de 2 V. A uma taxa de 100 Gb/s, o consumo de energia é de 4 pJ/b por SOA.

Apesar dos esforços de muitos grupos de pesquisas em avanços de desempenho de matrizes de portas SOAs [39], [40], parece improvável uma redução substancial na corrente necessária para o funcionamento desejado dos dispositivos. Sua razão de extinção limita o comprimento do dispositivo e isso delimita uma restrição na corrente necessária para alcançar uma densidade de portadora  $N$  grande o suficiente para atingir um ganho adequado. Para alcançar uma energia de chaveamento menor seria necessário diminuir substancialmente o volume da região ativa do dispositivo ou diminuir a taxa de emissão espontânea e atualmente parece existir pouco espaço para avanços significativos em ambas as áreas.

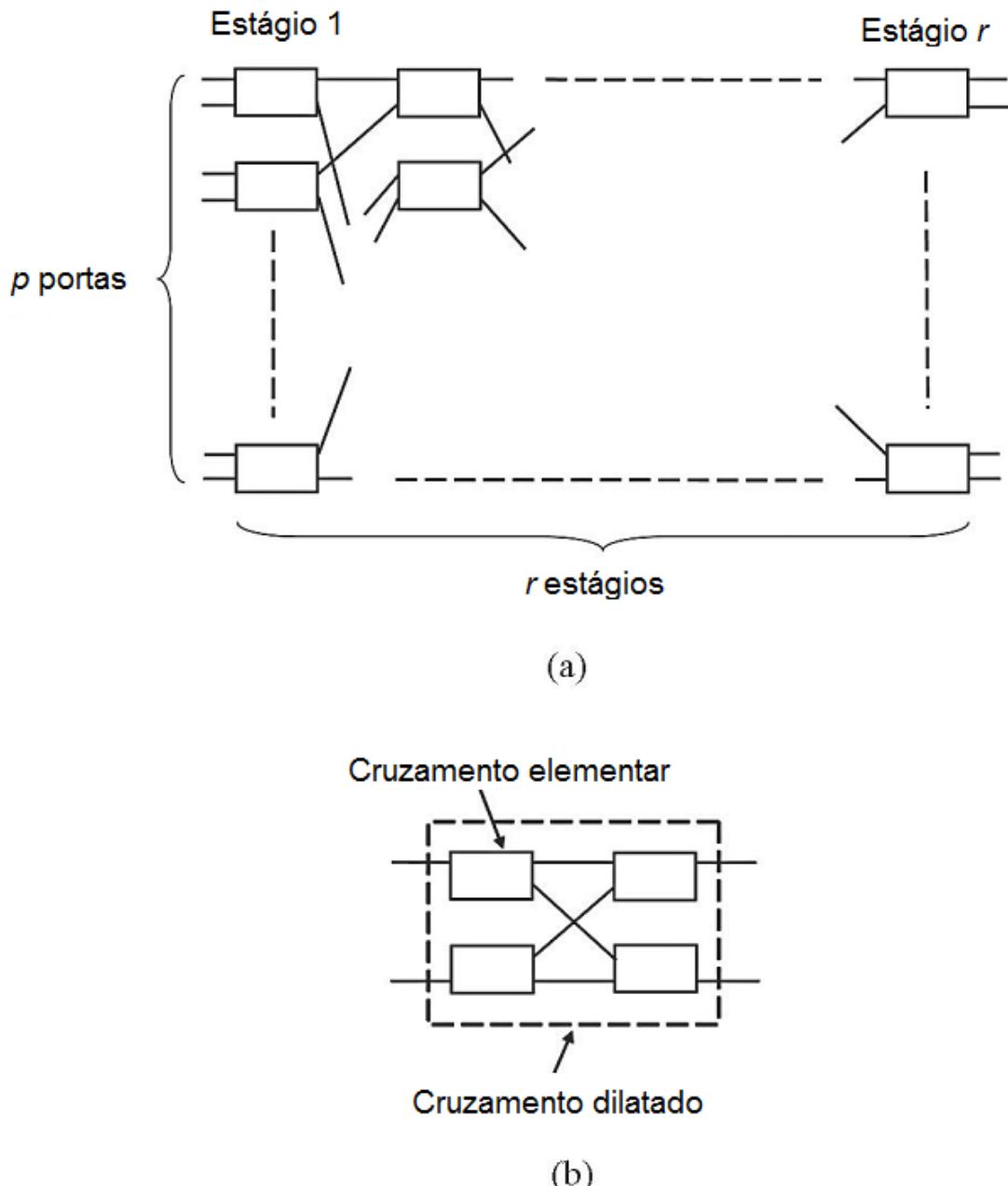
#### 4.1.3. Matriz de Chaveamento Cruzado 2x2

Cada bloco de comutação da Figura 4 pode ser construído usando matrizes cruzadas 2x2. Um esquemático de um comutador Benes  $p\times p$  [43] baseado em um 2x2 cruzado é apresentado na Figura 10(a). O número de estágios  $r$  na estrutura Benes é:

$$r = \lceil 2\log_2 p - 1 \rceil \quad (9)$$

Matrizes 2x2 cruzadas são de difícil ampliação devido ao efeito de diafonia (*crosstalk*). Tal efeito é muitas vezes descartado na literatura. O uso da estrutura dilatada (ampliada) de cruzamentos é uma forma de mitigar esse efeito e é ilustrada na Figura 10(b) [44]. Essa estrutura utiliza quatro matrizes 2x2 cruzadas elementares, reduzindo significantemente o *crosstalk*, porém dobrando as perdas ópticas e aumentando o

controle de energia por um fator 4. Versões ampliadas de arquiteturas de comutação maiores também são possíveis, porém elas geram um aumento significativo no consumo de energia e, inclusive, perda óptica.



**Figura 10 - (a) Chave  $p \times p$  de cruzamentos  $2 \times 2$ . (b) Cruzamento dilatado (ampliado), com quatro cruzamentos elementares [1].**

Se cada um dos comutadores da Figura 4 fossem construídos utilizando uma matriz de cruzamento  $2 \times 2$  na arquitetura Benes da Figura 10(a), a energia  $E_{switch,i}$  em (1) seria:

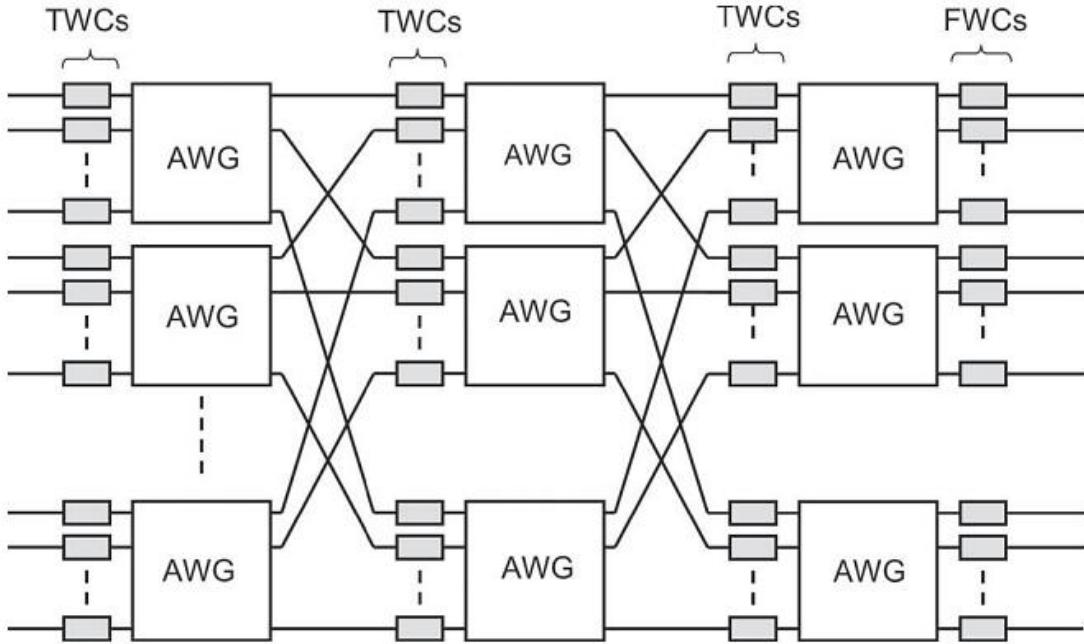
$$E_{switch,i} = \sum_{j=1}^r E_{crosspoint,j} \quad (10)$$

Nessa equação,  $E_{crosspoint,j}$  é a energia por *bit* em um estágio de cruzamento  $j$  do comutador Benes na Figura 10(a). Se todas essas matrizes cruzadas consumissem aproximadamente a mesma energia, (10) poderia ser simplificada para  $E_{switch,i} \sim rE_{crosspoint}$ .

Uma rede baseada em comutadores de núcleo com 1024 portas de entrada e 1024 portas de saída (comutador  $10^3 \times 10^3$ ) é tratada na seção IV desta monografia. Para  $p = 1024$ , o número de estágios é  $r = 19$ . Dessa forma, a energia por *bit* em um comutador  $10^3 \times 10^3$  é aproximadamente 19 vezes a energia por *bit* em um único cruzamento.

#### 4.1.4. Matrizes Chaveadas por Comprimento de Onda

Um esquemático de uma matriz chaveada pelo comprimento de onda (*wavelength-routed*) é representado na Figura 11. Ela é baseada em conversores ópticos de comprimento de onda e grades ordenadas de guias de onda (AWG: *arrayed-waveguide gratings*) [26]. As AWGs são dispostas em uma arquitetura Clos de três estágios e uma matriz de conversores de comprimentos de onda sintonizáveis (TWC: *tunable wavelength converters*) na entrada de cada estágio AWG. Uma matriz de conversores de comprimento de onda fixos (FWCs: *fixed wavelength converters*) na saída do comutador aloca os comprimentos de ondas de saída. Uma análise energética [26] da matriz de comutação de três estágios na Figura 11 mostra que o consumo de energia de um comutador com 2500 portas de entrada e saída está em torno de  $1 \text{ pJ/b}$ , ou cerca de  $300 \text{ fJ/b}$  por estágio.



**Figura 11 - Matriz chaveada pelo comprimento de onda [1].**

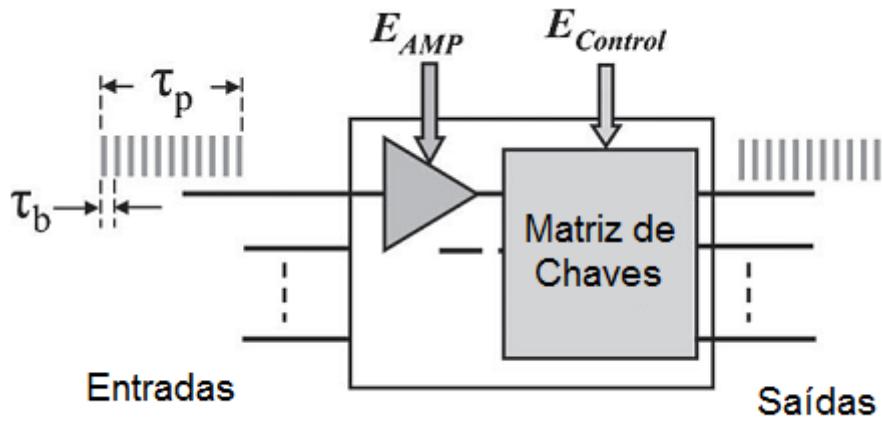
#### 4.1.5. Comutação por Pacotes

O fato de uma matriz de chaveamento, em uma comutação por pacotes, operar na condição pacote a pacote e não *bit a bit* faz com que ela ofereça vantagens na economia de energia [45], porque dessa forma não é necessário tratar os *bits* de forma individual [46]. Na Figura 12 essa situação é ilustrada, mostrando um comutador linear analógico operando como um comutador de pacotes. Nessa figura, pode-se observar a aproximação de um pacote com um período de *bit* de  $\tau_b$  e um comprimento de pacote de  $\tau_p$ . Esse comutador inclui uma matriz de chaves e um amplificador para sobrepujar as perdas nessa matriz (não necessariamente em matrizes de portas SOA). A energia do amplificador por *bit* é  $E_{AMP}$  e o controle de energia por pacote é  $E_{Control}$ .

A energia total por *bit* na comutação por pacote da Figura 12 é:

$$E_{bit} = E_{AMP} + \frac{E_{Control}}{N_b} \quad (11)$$

Nessa equação,  $N_b = \tau_p/\tau_b$  é o número de *bits* em um pacote [46]. O termo  $E_{Control}$  representa a energia de controle por *bit* e conforme o número de *bits* de um pacote aumenta a energia diminui. Com isso, em algumas implementações de comutadores, essa energia de controle pode ser menor do que a energia de controle por operação de chaveamento.



**Figura 12 - Comutação de pacotes usando uma matriz de chaveamento analógica linear [1].**

Essa redução na energia de controle por *bit* é vista como uma vantagem da comutação óptica por pacotes, que utiliza dispositivos analógicos de comutação. No entanto, nem sempre é possível realizar na prática essa redução teórica. Por exemplo, em comutações a velocidades mais altas, como no caso de matrizes de portas SOA ou matrizes de comutadores eletro-ópticos com terminações resistivas, a matriz consome potência continuamente. Nesses casos específicos, o termo  $E_{Control}$  é proporcional ao termo  $N_b$  e com isso o benefício do termo  $N_b$  no denominador da equação é perdido.

Na Figura 12, a operação da função de encaminhamento de pacotes em um chaveamento é demonstrada. No entanto, essa não é a única função que consome energia no comutador, outras funções como o *buffering* (garantia de acoplamento de impedância e ganho de potência estável), pesquisa de endereçamento IP e funções de segurança também contribuem no gasto de energia dos comutadores. Em roteadores IP atuais, a função de chaveamento de pacotes representa apenas 10% do consumo total de potência do roteador [21]. Dessa forma, da equação (2), o fator de *overhead* de energia  $\eta_{subsystem}$  [2] para um roteador IP é aproximadamente 10.

## 4.2. Comutadores Digitais

### 4.2.1. Transistores CMOS

Ao contrário dos comutadores analógicos, os mecanismos digitais processam os dados em uma base *bit a bit*. O inversor CMOS, de uma entrada e uma saída, é um exemplo desses comutadores eletrônicos digitais e está representado na Figura 13. Esse inversor possui uma alimentação  $V_{DD}$ , uma corrente de vazamento  $I_{leakage}$ , uma capacidade combinada de porta  $C_{gate}$  e um fio na saída de comprimento  $L_W$  e

capacitância  $C_W L_W$ , na qual  $C_W$  é a capacidade do fio por unidade de comprimento. A energia total por *bit* consumida pelo inversor e o fio na saída é dada por:

$$E_{bit} = \frac{1}{2} (C_{gate} + C_W L_W) V_{DD}^2 + \frac{V_{DD} I_{leakage}}{\gamma f} \quad (12)$$

Nessa equação,  $\gamma$  é o fator de atividade e  $f$  é a frequência de operação. Desprezando a corrente de fuga e considerando um inversor com um fio bem curto na saída, a energia por *bit* passa a ser:

$$E_{bit} = \frac{1}{2} C_{gate} V_{DD}^2 \quad (13)$$

Às vezes o termo  $E_{bit}$  em (13) é referenciado como a energia de chaveamento do dispositivo. Para o inversor CMOS da Figura 13 a energia de chaveamento é somente a energia de entrada requerida para carregar as duas capacitâncias de porta. A Figura 14 mostra a energia de chaveamento de um único transistor CMOS em função do tempo. Nela são usados dados históricos e previsões futuras baseadas na ITRS (*International Technology Roadmap for Semiconductors*) [47]. A capacidade de porta dos transistores CMOS está caindo de acordo com a diminuição do tamanho de seus dispositivos ao longo do tempo. Essa situação leva a uma queda na energia de chaveamento, equacionada em (13). Com circuitos cada vez menores e com o avanço do controle no processo de manufatura dos transistores, têm-se uma redução na tensão de operação que leva a futuras reduções no consumo de energia.

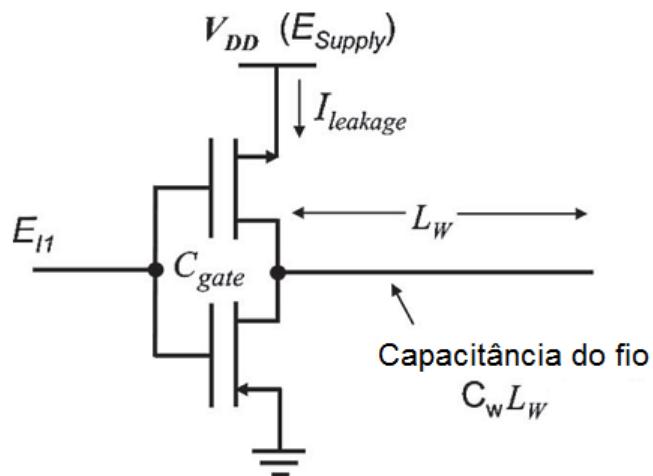
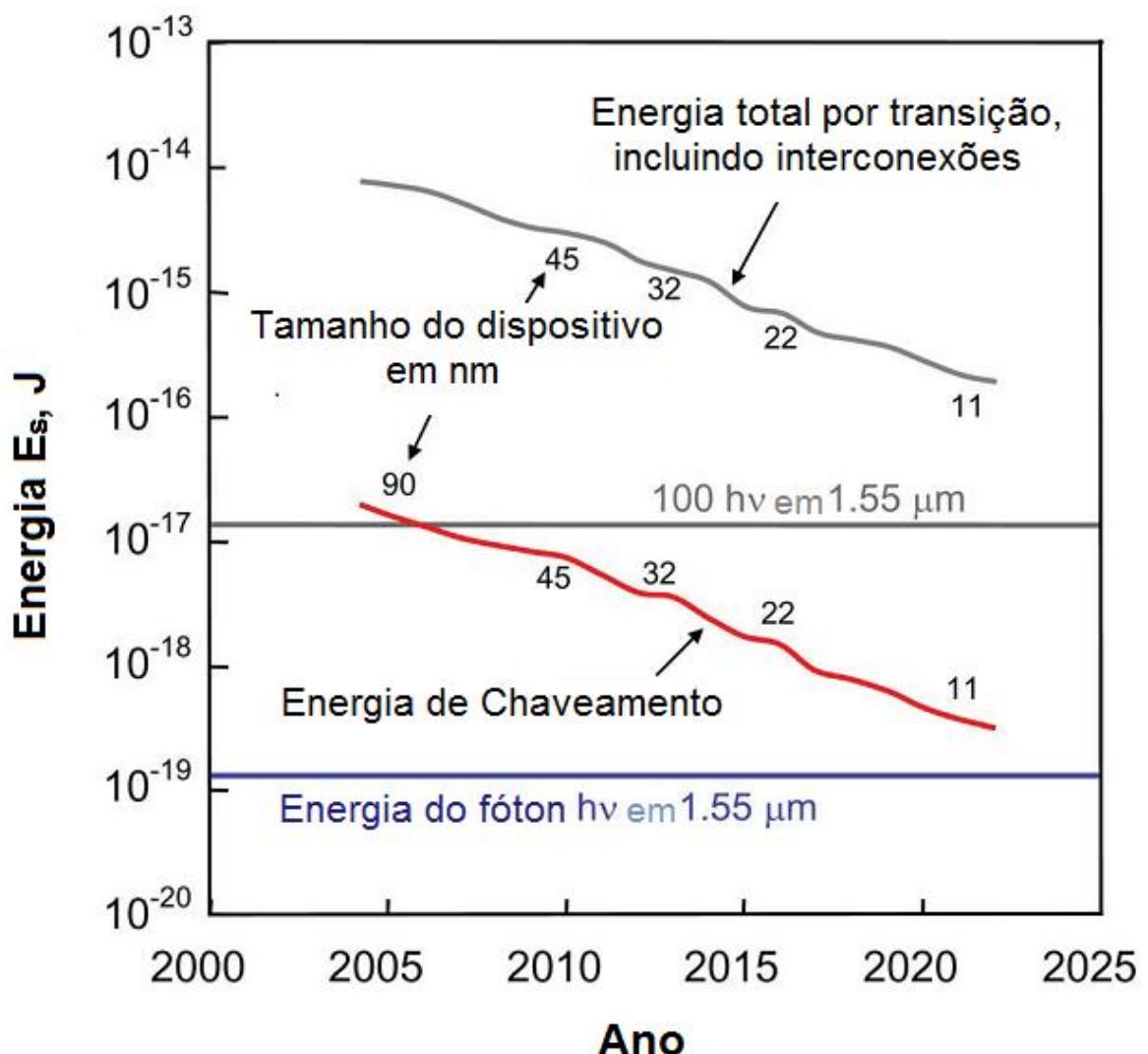


Figura 13 - Inversor simples CMOS.



**Figura 14 - Energia de chaveamento  $E_s$  (J) x Ano [1].**

A Figura 14 ainda mostra a energia gasta por um fóton a um comprimento de onda de  $1,55 \mu m$  bem como a energia de 100 fótons. Esses dados servem para constatar que a energia de chaveamento de um único transistor CMOS (com tecnologia de 45-nm) é menor que a energia de 100 fótons.

A energia total por transição é traçada na Figura 14 (curva superior) de acordo com a equação (12). Esses dados foram estimados tendo como base um circuito com tecnologia de 2010 (32-nm) e projetados até 2022 de acordo com o roteiro da ITRS [47]. Para estimar a energia total, consideramos um processador comercial de dois núcleos e tecnologia 32-nm, que consome uma potência de  $25 W$  por núcleo a uma frequência de operação de  $3 GHz$ . É estimado que cada núcleo possui cerca de 25 milhões de transistores e um fator de atividade em torno de 10%. Desses dados, a energia total

média por transistor (incluindo interconexões) por transição é em torno de  $3 \text{ fJ}$ . A partir desses dados é possível estimar que o comprimento médio de um fio interconectado em um processador de 32-nm é  $L_W \sim 2 - 3 \text{ } \mu\text{m}$ . A Figura 14 também contém dados para outros tamanhos de circuitos. Esses dados foram obtidos a partir de uma escala do tamanho médio do fio interconectado com o tamanho do transistor além da utilização de outros parâmetros do roteiro da ITRS [47].

#### 4.2.2. Dispositivos Ópticos Digitais

Dispositivos ópticos digitais podem ser criados com diversos tipos de materiais ópticos não lineares [48]. Tais dispositivos conseguem alcançar altas velocidades de operação, porém, normalmente, possuem um consumo de energia considerável.

Os dispositivos ópticos digitais possuem uma desvantagem em relação ao CMOS e a outros dispositivos eletrônicos: não provêem ganho de sinal. Na tecnologia eletrônica, cada porta pode manter um nível de sinal consistente entre a entrada e saída, garantindo uma operação correta em funções lógicas complexas e a habilidade de *drive* de múltiplas portas. Essas características são comumente referidas como restauração de nível e *fan-out* [34], e podem ser alcançadas com dispositivos ópticos sob o custo da adição de uma amplificação óptica adicional [34]. Infelizmente, informações detalhadas sobre o consumo de energia necessário para garantir a restauração de nível (nesses amplificadores adicionais) são precárias.

Hinton et al. [34] examinou a literatura quanto aos seguintes dispositivos lógicos: SOAs, fibras ópticas altamente não lineares (HNLFs: *highly non-linear fibers*), niobato de lítio com inversão periódica (PPLN: *periodically polled lithium niobate*) e nanofios de silício. Essa análise incluiu as estimativas necessárias para prover a restauração de nível. O estudo descobriu que o consumo total de energia em dispositivos ópticos de processamento digital (incluindo a fonte de alimentação e a potência consumida pelos amplificadores ópticos associados) está entre 1 e  $10 \text{ pJ/b}$  por dispositivo. Um único transistor CMOS (tecnologia de 32-nm) possui uma energia de chaveamento aproximadamente cinco ordens de grandeza menor do que os 1 a  $10 \text{ pJ/b}$  dos dispositivos ópticos não-lineares. Já a energia total por transição é três ordens de grandeza menor.

A Tabela 1 contém informações sobre as energias de chaveamento de alguns dispositivos considerados ao longo dessa monografia. As chaves E-O e SOAs possuem entradas e saídas ópticas. Com isso, seus sinais permanecem na forma de onda óptica

ao longo do chaveamento. Esses dispositivos são considerados como O/O/O. As chaves E-O também são classificadas como *lumped* (ou seja, possuem baixa velocidade de chaveamento e capacidade limitada) e TW (com resistência limitada).

**Tabela 1 - Consumo de energia em dispositivos de chaveamento [1].**

Tecnologia			Energia por bit			
			Tecnologia de 2010		Alvo	
			Chave 2x2	Chave $10^3 \times 10^3$	Chave 2x2	Chave $10^3 \times 10^3$
O/O/O	E-O	<i>Lumped</i>	20 fJ	-	20 fJ	-
		TW	1,8 pJ	-	1 pJ	20 pJ
		Matriz de portas SOA	8 pJ	-	4 pJ	75 pJ
E/O/E	<i>Wavelength-routed</i>		-	-	-	10 pJ
	CMOS		200 fJ (+ 61 pJ)	4 pJ (+ 61 pJ)	20 fJ (+ 5,1 pJ)	400 fJ (+ 5,1 pJ)

As chaves O/E/O mencionadas na Tabela 1 são classificadas dessa forma porque em algum momento, dentro da chave, o sinal precisa ser convertido da forma óptica para a forma eletrônica. As chaves que roteiam pelo comprimento de onda (*wavelength-routed*) são baseadas nas matrizes chaveadas AWG da Figura 11, com conversores opto-eletrônicos. Já as chaves CMOS incorporam conversores O/E e E/O nas suas respectivas entradas e saídas.

As informações inclusas sob o nome “Chaves 2x2” na Tabela 1 se referem a uma única chave cruzada e tem como base uma taxa de acesso de  $100 \text{ Gb/s}$  e um comprimento médio de pacote de  $10^4 \text{ bits}$ , típicos de um pacote IP. Já a taxa de chaveamento é de uma operação por pacote, que é equivalente a uma taxa média de chaveamento de  $10 \text{ MHz}$ . Os dados sob o rótulo “Chaves  $10^3 \times 10^3$ ” se referem a uma matriz de arquitetura Clos  $10^3 \times 10^3$  a uma mesma taxa de *bit* e média de comprimento de pacote do caso anterior. Uma estimativa para essas chaves usando tecnologia de 2010 não foi incluída na tabela porque essas chaves ópticas de alta velocidade ainda estão para serem demonstradas. As energias para as chaves E-O são baseadas em uma tensão de chaveamento de  $3 \text{ V}$  com uma terminação resistiva de  $50 \Omega$  para dispositivos TW. Para as chaves eletro-ópticas *lumped*, é assumido um tempo de propagação do

dispositivo  $\tau_{prop} = 1$  ns. Essas chaves que possuem capacidades de entrada não são facilmente ampliadas em tamanho pela necessidade de longas linhas elétricas, que precisam ser extintas. A perda por inserção das chaves eletro-ópticas é assumida como sendo 3 dB por cruzamento. Nesse nível de atenuação, o termo  $E_{AMP}$  de (11) é muito menor que o termo  $E_{Control}$ .

No caso particular das chaves CMOS (última linha da Tabela 1), é necessária a incorporação de multiplexadores e demultiplexadores eletrônicos, como ilustrado na Figura 6(a). Para que isso seja possível, são necessárias múltiplas matrizes de chaves paralelas, cada uma operando abaixo da taxa da linha. É, portanto, necessária a inclusão de circuitos MUX/DEMUX com chaves CMOS nos cálculos de energia. Mesmo assim, é importante notar que a energia por *bit* nessa estrutura independe do número de matrizes paralelas, evidenciando que o chaveamento eletrônico é prontamente adaptável para processamento paralelo de dados. É assumido que cada cruzamento 2x2 nas matrizes chaveadas contenham 16 transistores CMOS.

Ainda na Tabela 1, os valores referentes ao CMOS que estão em parênteses representam a energia total dos circuitos receptores, *drivers* e *lasers* nos conversores E/O e O/E associados às suas entradas e saídas, além dos circuitos MUX/DEMUX associados às chaves. As energias dos *drivers* e *lasers* são para um transmissor que usa um modulador de eletro-absorção (um total de 27 pJ para tecnologia de 2010 e 0,6 pJ para a tecnologia rotulada como “Alvo”). Já o consumo de energia para os circuitos MUX/CDR/DEMUX associados com transmissores e receptores ópticos possui um total de 30 pJ para tecnologia de 2010 e 4 pJ para a tecnologia “alvo”. Os parâmetros para a chave *wavelength-routed* são retirados de [26]. Os demais parâmetros de dispositivos são os mesmos descritos anteriormente nessa seção.

É esperado que ocorram avanços tecnológicos nesses dispositivos de chaveamento. Os dispositivos eletro-ópticos de matrizes de portas SOA e *wavelength-routed* devem possuir avanços limitados, principalmente pelo grau de maturidade alcançado por essas tecnologias. Essas expectativas de melhorias são refletidas na Tabela 1 sob o rótulo “alvo”. Outra informação que confirma antigas descobertas [26] é de que, normalmente, as matrizes ópticas não são competitivas no quesito de eficiência energética quando comparadas à tecnologia CMOS. As chaves *wavelength-routed* ainda podem se tornar competitivas [21], no entanto, suas vantagens de energia sobre o CMOS seriam, na melhor das hipóteses, marginais e mesmo assim existiriam diversos

problemas práticos a serem resolvidos, incluindo um maior *footprint* das chaves ópticas [26].

Outra característica interessante de ser mencionada é de que, pela Figura 14, os avanços na tecnologia CMOS tendem a melhorar em mais de uma ordem de grandeza na questão da eficiência energética até 2025. Esses valores alvos da Tabela 1 também são mais otimistas do que o artigo de 2006 do Tucker [26], porque nele as projeções futuras tinham como base uma tecnologia CMOS de 22-nm. Nessa tabela, as estimativas são baseadas em uma tecnologia de 11-nm.

Se comparadas, as energias de chaveamento de uma matriz CMOS  $10^3 \times 10^3$  (Tabela 1) com os dados da Figura 2, é possível concluir que os comutadores Ethernet consomem uma energia ( $10 \text{ nJ/b}$ ) que é maior em até três ordens de grandeza relativas à uma tecnologia de 2010 ( $70 \text{ pJ/b}$ ), e esse valor pode variar de três a quatro ordens de grandeza se comparadas com o valor alvo dessa mesma tabela.

Dois motivos podem explicar essas diferenças: 1) em um roteador moderno a matriz de chaveamento contribui com apenas 10% do consumo de potência total [49], e 2) os dispositivos de rede atuais usam, tipicamente, tecnologias CMOS mais antigas (ou seja, dispositivos de 130 - 90-nm ao invés de 45 - 35-nm da tecnologia mais atual, principalmente quando comparada com a tecnologia alvo, de 11-nm). De acordo com a Figura 14, a diferença no consumo de energia entre as gerações de 90-nm e 11-nm é de aproximadamente duas ordens de grandeza.

Observando os dados da Tabela 1, percebe-se que as tecnologias CMOS devem avançar significativamente enquanto houver incerteza nas melhorias dos mecanismos de chaveamento óptico, o que sugere que os dispositivos eletrônicos de chaveamento podem oferecer melhores taxas de avanço na comutação por pacotes do que os dispositivos ópticos [46].

## CAPÍTULO 5: CONSUMO DE ENERGIA DA REDE

Com os valores já estimados dos mecanismos de transporte [2] e mecanismos de chaveamento (capítulo 4), é o momento de utilizar o modelo apresentado no capítulo 3 para calcular o consumo de energia de uma rede fim a fim. O modelo de rede utilizado é do tipo Core, com matrizes de chaveamento  $10^3 \times 10^3$ . Esse tipo de chaveamento foi escolhido porque representa uma escala prática de chaves nas redes.

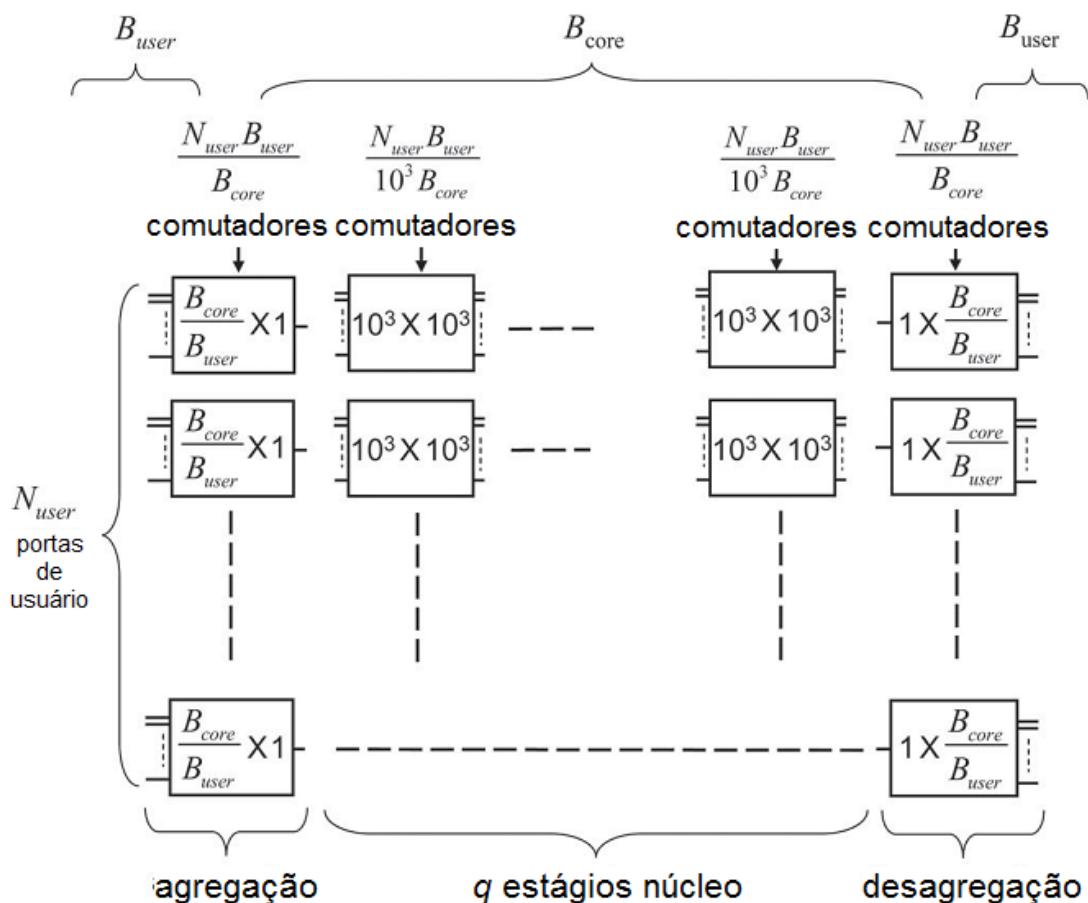


Figura 15 - Modelo de rede fim a fim [1].

A análise feita nessa seção é simples, ou seja, não será aprofundada em modelos de tráfego e detalhes de multiplexação estatística. O arranjo  $10^3 \times 10^3$  da Figura 15 não mostra os detalhes do sistema de transporte entre estágios adjacentes das chaves na rede. Ou seja, é assumido que todos os *links* na rede operam em sua capacidade máxima (completamente carregados).

O número de dispositivos de usuários é  $N_{user}$ , e cada um deles está operando a uma taxa de *bits*  $B_{user}$ . Já a rede opera a uma taxa de *bits*  $B_{core}$ . Os dados dos usuários

são multiplexados da taxa  $B_{user}$  para  $B_{core}$  por um conjunto de chaves de agregação. Existe uma porta na saída de cada chave de agregação, e o número de portas de entradas é dado por  $B_{core}/B_{user}$ . Como representado na Figura 15, o número total de chaves de agregação é  $N_{user} B_{user}/B_{core}$ . O núcleo da rede compreende uma matriz  $N_{user} B_{user}/10^3 B_{core}$  por  $N_{user} B_{user}/10^3 B_{core}$  de chaves  $10^3 \times 10^3$ , conectadas por uma arquitetura Clos. O núcleo da rede também alimenta um conjunto de chaves desagregadoras, responsáveis por demultiplexar os dados de volta para a taxa  $B_{user}$  e o número de estágios  $q$  dessas chaves pode ser equacionado da seguinte forma:

$$q = \lceil 2\log_{1024}t - 1 \rceil \quad (14)$$

Nessa equação,  $t = N_{user} B_{user}/10^3 B_{core}$  é o número de chaves  $10^3 \times 10^3$  em cada estágio do núcleo da rede de chaveamento.

**Tabela 2 - Energia mínima por bit E\_net para dois cenários de rede [1].**

Tecnologia de chaveamento	Cenário 1			Cenário 2		
	$N_{user}$	$B_{user}$ (Mb/s)	$N_{user}$	$B_{user}$ (Mb/s)		
	$10^{10}$	10	$10^{11}$	$10^3$		
	Energia por bit, $E_{net}$ (pJ)			Energia por bit, $E_{net}$ (pJ)		
	Somente chaveamento	Somente transporte	Total	Somente chaveamento	Somente transporte	Total
E-O TW (Alvo)	72	2	74	83	2,5	86
Matriz SOA (Alvo)	290	2	292	340	2,5	343
AWG/TWC (Alvo)	36	2	36	42	2,5	45
CMOS (Alvo)	20	10	30	31	24	55
CMOS (2010)	225	160	385	372	210	582

São considerados dois cenários para o cálculo do limite inferior do consumo de energia na rede. O primeiro cenário conta com uma rede global com 10 bilhões de dispositivos conectados, operando a taxas de 10 Mb/s. Já o segundo cenário, contém 100 bilhões de dispositivos a taxas de 1 Gb/s. A primeira rede possui uma taxa média de agregação de  $10^{17}$  b/s (100 Pb/s) e representa uma situação que pode acontecer entre os anos de 2020 e 2030 (Como comparação, a Internet atual opera a uma taxa média de agregação de 100 Tb/s [50]). O segundo exemplo de rede possui, por sua vez,  $10^{20}$  b/s

(100  $Eb/s$ ) e representa uma possibilidade mais futurística que poderá se tornar realidade a partir do ano de 2050.

Para calcular os dados da Tabela 2, foram usadas as energias “alvo” para cada um dos mecanismos de chaveamento da Tabela 1, com exceção da última linha, que utilizou os dados da tecnologia de 2010 para fins de comparação. Esses dados foram calculados para os dois cenários exemplos dos parágrafos anteriores. As figuras de energia da coluna “Somente chaveamento” da Tabela 2 representam o termo  $\sum_{i=1}^S E_{switch,i}$  de (1) e incluem a energia por *bit* dos estágios do núcleo da rede bem como a energia nas chaves de agregação e desagregação. Para o primeiro cenário,  $q = 1$  e  $S = 3$ , já para o segundo cenário,  $q = 3$  e  $S = 5$ .

As figuras de energia da coluna “Somente transporte” da Tabela 2, representa a porção  $\sum_{i=1}^{S-1} E_{core-transport,i} + E_{access-transport}$  de (1). Os valores desses campos podem ser encontrados na Figura 6 e nas Tabelas 2 e 3 de [2]. Nesse caso, foi estimado um alcance médio do sistema de transporte (ou seja, entre chaves) de 3000  $km$  para o primeiro cenário e 2000  $km$  para o segundo cenário. O espaçamento de amplificadores é de 50  $km$  e a distância total de transmissão fim a fim é de aproximadamente 9000  $km$  para as duas redes. Foi considerada uma figura de energia de 3,6  $pJ$  para cada par TX/RX (incluindo MUX/DEMUX) no sistema de transporte para o exemplo de chave CMOS (última linha da Tabela 1). Também foi considerada a falta de necessidade de transmissores ou receptores nas entradas e saídas para os exemplos de chaveamento óptico, mesmo que na prática sejam necessários esses tipos de dispositivos em matrizes inteiramente ópticas [46]. Esses dispositivos foram desconsiderados por não terem impacto significante no resultado global devido ao domínio do consumo de energia por parte dos mecanismos de chaveamento se comparados aos conversores O/E/O. É assumido que a rede de acesso utiliza transmissores e receptores ópticos na interface de usuário. Para ela foi desconsiderado o uso de circuitos MUX/DEMUX porque opera a taxas de *bits* menores do que o núcleo da rede. Nesse contexto, o termo  $E_{access-transport}$  possui uma figura energética de 5  $pJ$ .

A partir das informações calculadas na Tabela 2 fica claro que o consumo de energia nas redes ópticas é dominado pelas operações de chaveamento. Também é possível chegar a uma conclusão sobre a qualidade de ampliação dessas redes. Partindo da informação de que o segundo cenário possui dez vezes mais dispositivos conectados do que o primeiro cenário, além de uma maior taxa de operação, seu consumo é de

menos de duas vezes maior que o do primeiro cenário. Obviamente os valores mostrados nessa análise levam em conta uma arquitetura de rede Clos ideal e que a rede opera no máximo de sua capacidade.

### 5.1. Comparação de Projeções de Energia

A Tabela 2 contém projeções idealizadas do limite inferior do consumo de energia nas redes, calculadas a partir de uma abordagem de análise *bottom-up*, baseada em dados estimados no nível dos dispositivos da rede. No entanto é interessante comparar esses dados com os da Figura 3, que se trata de uma abordagem *top-down*, baseada em um modelo de rede que utiliza dados reais de equipamentos e os extrapola para desempenhos futuros [21]. A diferença entre essas análises representa uma lacuna entre as tendências atuais e o desempenho ideal. Dessa forma, se todas as ineficiências e consumo associado a funções auxiliares fossem eliminados, essa lacuna seria estreitada. Essa análise iniciada na seção I é expandida nessa seção.

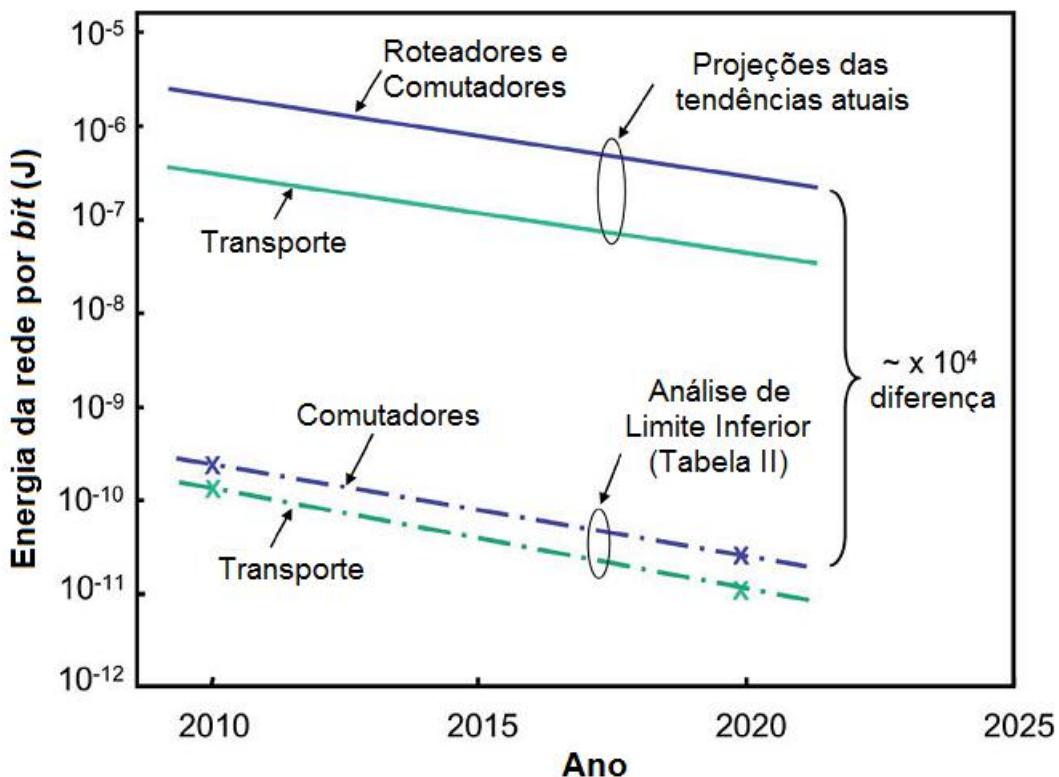


Figura 16 - Consumo de energia da rede por bit (J) x Ano [1].

Os consumos de energia por *bit* dos roteadores/chaves e sistema de transporte da Figura 3 e da Tabela 2 são traçados na Figura 16 em função do tempo. A tecnologia de chaveamento utilizada foi a CMOS e não a óptica. Se as tecnologias AWG ou E-O

fossem utilizadas, as informações “alvo” da Tabela 2 para o ano de 2020 seriam muito próximas das do CMOS devido à grande escala do eixo vertical da Figura 16. Se a tecnologia utilizada fosse de matrizes de portas SOA, a energia “alvo” seria significativamente maior. Para simplificar a análise, a Figura 16 não inclui o consumo das redes de acesso.

As curvas tracejadas na Figura 16 representam a análise *bottom-up* idealizada, já as curvas cheias representam a análise *top-down*. A primeira é cerca de quatro ordens de grandeza menor do que a segunda, e existem cinco grandes motivos que explicam essa diferença:

- 1) As redes atuais são muito mais complexas do que o modelo “mínimo” da Figura 4, e que serve de base para a Tabela 2. Atualmente, uma conexão fim a fim atravessa, na média, 20 chaves e roteadores [21], uma ordem de magnitude maior do que o número utilizado no modelo ideal da Figura 3.
- 2) Os dados de limite inferior das curvas tracejadas são para subsistemas ideais, ou seja, sem ineficiências e *overheads* de energia. Portanto, com parâmetros de eficiência de subsistema  $n_{subsystem}$  unitários (ver capítulo 5 e Figura 11 de [2]). Em sistemas de transporte reais, esse valor gira em torno de  $10^{-3}$  ou menos.
- 3) Roteadores consomem, tipicamente, mais energia do que as chaves cruzadas internas, conforme apontado no capítulo 4. Mecanismos de encaminhamento e *buffer* também consomem uma energia considerável. De forma similar, comutadores Ethernet e outros dispositivos de rede contêm *overheads* substanciais de energia. Funções de *overheads* em roteadores, comutadores e outros dispositivos são discutidos em detalhe em [23].
- 4) Muitos *links* ópticos e roteadores operam bem abaixo de suas capacidades máximas, e quando isso ocorre, o consumo de energia por *bit* aumenta.

Os componentes de roteadores comerciais são, normalmente, uma ou duas gerações mais antigas do que as disponíveis e muito atrasadas em relação à tecnologia “alvo” da Tabela 2.

## 5.2. Comparação de Tecnologias

Deve-se ter muito cuidado em comparações das figuras de energia de roteadores eletrônicos atuais ou seus componentes, com as de demonstrações experimentais de

baixa escala em chaveamentos ópticos. As análises experimentais, devido à sua natureza ideal, produzem resultados mais próximos ao limite inferior, sem contar que os dispositivos comerciais possuem muito mais funcionalidades do que os experimentais. A Figura 16 ilustra essa situação. A curva mais acima representa as figuras de energias dos dispositivos comerciais. Já a segunda curva de baixo para cima representa a figura de energia dos dados experimentais. Essas comparações se mostram limitadas porque essa diferença das curvas se deve a outros fatores, explicitados nos parágrafos anteriores.

A análise realizada e sumarizada na Tabela 2 mostra que é improvável a substituição dos eletrônicos, no chaveamento de dados, pela tecnologia óptica. Mesmo com os dispositivos ópticos oferecendo uma maior velocidade de operação quando comparados aos eletrônicos, uma combinação adequada de circuitos MUX/DEMUX no chaveamento eletrônico pode, por si só, lidar com dados a velocidades bem altas. Ultimamente, a escolha de tecnologias tem recaído sobre diversas considerações, porém, o consumo de energia tem sido a mais relevante [46]. Como apontado na seção seguinte, uma solução pode ser o aumento da quantidade de circuitos ópticos de baixa velocidade, fornecendo um *bypass* óptico em torno dos roteadores [22].

## CAPÍTULO 6: CONCLUSÃO

### 6.1. Construindo uma Rede “Verde”

Para alcançar um bom nível de eficiência energética e dessa forma tornar uma rede “verde” é interessante considerar os sete pontos abaixo:

- 1) Componentes de rede como roteadores, comutadores e sistemas de transmissão dominam o consumo global de energia em uma rede de telecomunicação. Dessa forma é primordial que as futuras pesquisas continuem trazendo avanços na eficiência energética desses dispositivos. Alguns desses avanços virão como consequência natural do aumento da eficiência energética do CMOS e de outros componentes eletrônicos. Outros necessitarão de inovações adicionais significantes no desenho e arquiteturas de seus elementos.
- 2) Avanço na eficiência de componentes ópticos e eletrônicos internos e como eles são empregados. O desenvolvimento de moduladores ópticos capazes de atingir altas velocidades com um baixo requerimento de *driver*, bem como amplificadores para atingir esse *driver*. Os amplificadores baseados em fibra óptica se beneficiaram com um bombardeamento laser mesmo estando no ápice de suas capacidades.
- 3) Reduzir as perdas de energias ou ineficiências bem como as despesas de energia consumidas por funções periféricas no transporte e chaveamento dos dados. Tanto o desenho dos equipamentos quanto a arquitetura da rede influenciam para o surgimento de *overheads* de energia. Essas despesas extras de energia podem ser maiores do que o próprio consumo efetivo das funções básicas contempladas tanto nessa monografia quanto na do Matheus [2].
- 4) As velocidades de transmissão estão aumentando, e com elas, a necessidade de balancear os formatos de modulação concorrentes com os protocolos de codificação. Nas redes atuais, onde os *overheads* de energia nos amplificadores são altos, uma estratégia útil para a eficiência energética é a alta eficiência espectral devido à baixa quantidade de amplificadores necessários. No entanto, se os *overheads* puderem ser reduzidos significativamente, formatos de modulação com baixa eficiência espectral podem acabar trazendo uma melhor eficiência energética global dos que os formatos de modulação de alta eficiência

espectral. De forma análoga, a energia consumida na codificação e decodificação precisa ser balanceada contra os benefícios da codificação.

- 5) É necessário um planejamento da rede para que a mesma se aproveite das novas tecnologias dos dispositivos em cada ponto de sua estrutura. Cabe o uso de comutadores eletrônicos quando necessário processamento de tráfego de sub-comprimento de onda em um ponto específico. O uso de *bypass ópticos*, com *cruzamento* e multiplexadores ópticos de adição/subtração (OADMS: *optical add/drop multiplexer*) pode reduzir o número de comutadores e roteadores necessários e, consequentemente, o consumo de energia. Ainda, é necessário dar atenção na inclusão de formas de tráfego de sub-comprimento de onda que sejam mais eficientes do que a comutação por pacotes [51].
- 6) Sistemas de transporte e chaveamento possuem a melhor eficiência energética se operarem em alta utilização. Eles devem ser dimensionados para possibilitar crescimento futuro e aguentar picos de carga, tendo a habilidade de colocar elementos pouco utilizados em um modo de economia de energia. Se a utilização dos recursos de um equipamento cair abaixo de um ponto crítico, o tráfego pode ser divergido para outros recursos de rede e o equipamento não utilizado pode entrar em um estado de hibernação. Estratégias e protocolos para essas idéias deverão gerenciar a utilização de dispositivos ativos e monitorar degradações na qualidade de serviço associadas com os altos níveis de utilização em canais estatisticamente multiplexados.
- 7) Os esforços para trazer avanços nas tecnologias de chaveamento eletrônico são mais prováveis de trazer resultados do que os esforços para desenvolver chaves ópticas de alta velocidade.

Esse estudo não tratou das redes acesso, no entanto ela contribui de forma significativa no perfil de energia das redes modernas. Pesquisas devem ser feitas para se reduzir o consumo dessas redes de acesso [29], incluindo o uso de tecnologias de baixa energia, protocolos eficientes e modos de hibernação.

Futuras análises do consumo das redes precisam levar em consideração o impacto de aplicações emergentes nos padrões de tráfego. Uma dessas áreas é a computação na nuvem. Nesse caso, é necessário analisar o consumo gasto no armazenamento dos dados e processamentos além do consumo conforme eles atravessam a rede. Deve-se também levar em consideração o impacto ambiental das

redes de telecomunicações, incluindo considerações da energia incorporada nos equipamentos físicos e o impacto do ciclo de atualização tecnológica no ambiente [52].

## 6.2. Conclusão.

Modelos quantitativos de consumo de energia em uma variedade de dispositivos de chaveamento foram modelados, e essas informações foram aplicadas a um modelo simples de uma grande rede chaveada. A estimativa do limite inferior da energia de uma rede global foi feita com base nesse modelo simples. As contribuições de diversos subsistemas no consumo de energia foram avaliadas usando estimativas agressivas de futuros avanços em diferentes tecnologias. Foram confirmadas sugestões prévias de que em uma rede de escala global, o consumo de energia na infraestrutura de chaveamento é maior do que o consumo de energia da infraestrutura de transporte.

As estimativas para o limite inferior calculadas nessa monografia são quatro ordens de grandeza menores do que as estimativas “*business-as-usual*”. Essa diferença não significa uma falha do modelo utilizado nessa monografia, apenas revela que existe uma lacuna muito grande entre o que é alcançável atualmente na prática com o que pode ser alcançado teoricamente. Para que essa lacuna diminua, pesquisas precisam ser feitas para reduzir os *overheads* de energia de funções periféricas das redes, além do desenvolvimento de equipamentos de chaveamento e transporte mais eficientes, reduzindo a infraestrutura necessária para seus funcionamentos. As redes de acesso também precisam ser consideradas devido a seu consumo energético significante nas redes atuais.

## 6.3. Trabalhos Futuros.

Após esse estudo, fica como um trabalho futuro a ampliação dessa análise para incluir estimativas sobre as redes de acesso. Apesar da dificuldade para se estimar o consumo nesse domínio de rede, ele ainda é responsável pela maior parte do consumo energético em uma rede interconectada. Com essa futura análise de acesso, com a de rede (realizada nesse trabalho) e a de transporte realizada em [2], todas as camadas seriam cobertas. Outra questão que pode ser mais bem aprofundada nesse próprio projeto é a possibilidade de realização de simulações das formulações apresentadas. Por fim, abranger essa análise para se levar em conta também algoritmos de roteamento, como eles poderiam ser melhorados e que impactos eles possuem no consumo de energia.

## REFERÊNCIAS

- [1] R.S. Tucker, "Green Optical Communications – Part II: Energy Limitations in Networks", *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, Vol. 17, No. 2, pp. 261-273, Mar./Apr. 2011.
- [2] M.P. Nogueira, "Planejamento do Consumo de Energia em Sistemas Ópticos de Comunicação: Camada de Transporte", Nov. 2012.
- [3] A.P. Bianzino, C. Chaudet, D. Rossi, and J.-L. Rougier, "A Survey of Green Networking Research", *IEEE Commun. Surveys & Tutorials*, Vol. 14, No. 1, Q1 2012.
- [4] Y. Zang, P. Chowdhury, M. Tornatore, and B. Mukherjee, "Energy Efficiency in Telecom Optical Network", *IEEE Commun. Surveys & Tutorials*, Vol. 12, No. 4, Q4 2010.
- [5] K.W. Roth, F. Goldstein, and J. Kleinman, "Energy Consumption by Office and Telecommunications Equipment in Commercial Buildings Volume I: Energy Consumption Baseline", Tech. Rep. Vol. I, National Technical Information Service (NTIS), US Department of Commerce, Jan. 2002.
- [6] B. Nordman and K. Christensen, "Reducing the Energy Consumption of Network Devices", IEEE 802.3 Tutorial, July 2005.
- [7] C. Lange, "Energy-Related Aspects in Backbone Networks", in *Proc. of 35<sup>th</sup> European Conf. on Optic. Commun. (ECOC 2009)*, (Wien, AU), Sept. 2009.
- [8] N. Ghani, S. Dixit, and T.S. Wang, "On IP-Over-WDM Integration", *IEEE Commun. Mag.*, Vol. 38, No. 3, pp. 72-84, Mar. 2000.
- [9] J. Manchester, J. Anderson, B. Doshi, and S. Dravida, "IP Over SONET", *IEEE Commun. Mag.*, Vol. 36, No. 5, pp. 136-142, May 1998.
- [10] Metro Ethernet Forum, (2012, Sep.), "Metro Ethernet Services – A Technical Overview", [Online], Available: [http://metroethernetforum.org/PDF\\_Documents/metro\\_ethernet\\_services.pdf](http://metroethernetforum.org/PDF_Documents/metro_ethernet_services.pdf)
- [11] 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, Mar. 2009.
- [12] D. Zuckerman, "Green Communications – Management Included", *IEEE Int. Conf. Commun. Workshops (Green-Comm'09)*, Dresden, Germany, Jun. 2009.

- [13] ITU, (2012, Sep.), “ITU symposia on ICTs and Climate Change”, [Online]. Available: <http://www.itu.int/ITU-T/worksem/climatechange/index.html>, 2009
- [14] IEEE, (2012, Sep.), “IEEE P802.3az energy efficient Ethernet task force”, [Online], Available: <http://www.ieee802.org/3/az/index.html>, 2009
- [15] B. Dugerdil, “ETSI green agenda”, [http://www.itu.int/dms\\_pub/itu-t/oth/06/0F/T060F0000090032PDFE.pdf](http://www.itu.int/dms_pub/itu-t/oth/06/0F/T060F0000090032PDFE.pdf), 2009
- [16] TIA Online, (2012, Sep.), “TIA environment”, [Online], Available: <http://tiaonline.org/environment/>, 2009
- [17] ATIS, (2012, Sep.), “ATIS NIPP”, [Online] Available: <http://www.atis.org/0050/index.asp>, 2009
- [18] ATIS, (2012, Sep.), “NIPP-TEE”, [Online], Available: <http://www.atis.org/0050/tee.asp>, 2009
- [19] A. Alimian, B. Nordman, and D. Kharitonov, *Network and Telecom Equipment Energy and Performance Assessment – Test Procedures and Measurement Methodology*. ECR Initiative, 2008.
- [20] Verizon, “TEER metric quantification”, <http://www.verizonnebs.com/TPRs/VZ-TPR-9207.pdf>, Jan. 2009.
- [21] J. Baliga, R. Ayre, K. Hinton, W.V. Sorin, and R.S. Tucker, “Energy Consumption in Optical IP Networks”, *J. Lightw. Technol.*, Vol. 27, No. 13, pp. 2391-2043, Jul. 2009.
- [22] R.S. Tucker, “Optical Packet-Switched WDM Networks – A Cost and Energy Perspective”, presented at the Opt. Fiber Commun. Conf. Expo., San Diego, CA, 2008.
- [23] O. Tamm, C. Hermsmeyer, and A.M. Rush, “Eco-Sustainable System and Network Architectures for Future Transport Networks”, *Bell Labs Tech. J.*, Vol. 14, pp. 311-328, 2010.
- [24] S. Grubb, R. Nagarajan, M. Kato, F. Kish, and D. Welch, “Photonic Integrated Circuits with SOAs in WDM Optical Networks”, in *Proc. Opt. Fiber Commun./Nat. Fiber Opt. Eng. Conf.*, 2008, pp. 1-3.
- [25] Core Optics Ultra-FEC Chip. (2012, Oct.). [Online]. Available: <http://www.coreoptics.com/>
- [26] R.S. Tucker, “The Role of Optics and Electronics in High-Capacity Routers”, *J. Lightw. Technol.*, Vol 24, No. 12, pp. 4655-4673, Dec. 2006.

- [27] D.T. Neilson, "Photonics for Switching and Routing", *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, Vol. 12, No. 4, pp. 669-677, Jul./Aug. 2006.
- [28] S. Han, "Moore's Law and Energy and Operations Savings in the Evolution of Optical Transport Platforms", *IEEE Comms. Mag.*, Vol. 48, No. 2, pp. 66-69, Feb. 2010.
- [29] J. Baliga, R. Ayre, W. Sorin, K. Hinton, and R.S. Tucker, "Energy Consumption in Access Networks", presented at the Opt. Fiber Commun. Conf. Expo., San Diego, CA, 2008.
- [30] Internet World Statistics, (2012, Oct.), [Online], Available: <http://www.internetworldstats.com/stats.htm>
- [31] C. Clos, "A Study of Non-Blocking Switching Networks", *Bell Syst. Tech. J.*, Vol. 32, pp. 406-424, 1953.
- [32] R.S. Tucker, G. Eisenstein, and S.K. Korotky, "Optical Time-Division Multiplexing for Very High Bit-Rate Transmission", *J. Lightw. Technol.*, Vol. 6, No. 11, pp. 1737-1749, Nov. 1988.
- [33] T. Yan and W. Shieh, "Coherent Optical OFDM Transmission Up to 1 Tb/s per Channel", *J. Lightw. Technol.*, Vol. 27, No. 16, pp. 3511-3517, Aug. 2009.
- [34] K. Hinton, G. Raskutti, P.M. Farrell, and R.S. Tucker, "Switching Energy and Device Size Limits on Digital Photonic Signal Processing Technologies", *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, Vol. 14, No. 3, pp. 938-945, May/Jun. 2008.
- [35] E.J. Murphy, T.O. Murphy, A.F. Ambrose, R.W. Irvin, B.H. Lee, P. Peng, G.W. Richards, and A. Yorinks, "16x16 Strictly Nonblocking Guided-Wave Optical Switching System", *J. Lightw. Technol.*, Vol. 14, No. 3, pp. 352-358, Mar. 1996.
- [36] I.M. Soganci, T. Tanemura, K.A. Williams, N. Calabretta, T. de Vries, E. Smalbrugge, M.K. Smit, H. Dorren, and Y. Nakano, "High-Speed 1x16 Optical Switch Monolithically Integrated on InP", in *Proc. 35<sup>th</sup> Eur. Conf. Optc. Commun.*, 2009, pp. 1-2.
- [37] H.S. Hinton, *An Introduction to Photonic Switching Fabrics*. New York: Plenum, 1993.
- [38] R.F. Kalman, L.G. Kazovsky, and J. W. Goodman, "Space Division Switches Based on Semiconductor Optical Amplifiers", *IEEE Photon. Technol. Lett.*, Vol. 4, No. 9, pp. 1048-1051, Sep. 1992.
- [39] S. Tanaka, S.-H. Jeong, S. Yamazaki, A. Uetake, S. Tomabechi, M. Ekawa, and K. Morito, "Monolithically Integrated 8:1 SOA Gate Switch with Large Extinction Ratio and

Wide Input Power Dynamic Range”, *IEEE J. Quantum Electron.* Vol. 45, No. 9, 1155-1162, Sep. 2009.

- [40] Y. Kai, K. Sone, S. Yoshida, Y. Aoki, G. Nakagawa, and S. Kinoshita, “A Compact Lossless 8x8 SOA Gate Switch Subsystem for WDM Optical Packet Interconnections”, presented at the ECOC, Brussels, Belgium, 2008.
- [41] M. Renaud and M.E. Bachmann, “Semiconductor Optical Space Switches”, *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, Vol. 2, No. 2, pp. 277-288, Jun. 1996.
- [42] N. Sahri, D. Prieto, S. Silvestre, D. Keller, F. Pommerau, M. Renaud, O. Rofidal, A. Dupas, F. Dorgeuille, and D. Chiaroni, “A Highly Integrated 32-SOA Gates Optoelectronic Module Suitable for IP Multi-Terabit Optical Packet Routers”, in *Proc. Opt. Fiber Commun. Conf.*, 2001. PD32-1 – PD32-3.
- [43] V. E. Benes, *Mathematical Theory of Connecting Networks and Telephone Traffic*. San Francisco, CA: Academic, 1965.
- [44] G.H. Song and M. Goodman, “Asymmetrically-Dilated Cross-Connect Switches for Low-Crosstalk WDM Optical Networks”, in *Proc. IEEE Lasers Electro-Opt. Soc. Annu. Meeting*, 1995, pp. 212-213.
- [45] D.K. Hunter and I. Andonovic, “Approaches to Optical Internet Packet Switching”, *IEEE Commun. Mag.*, Vol. 28, No. 9, pp. 116-122, Sep. 2000.
- [46] R.S. Tucker, “Optical Packet Switching: A Reality Check”, *Opt. Switching Netw.*, Vol. 5, pp. 2-9, 2008.
- [47] International Technology Roadmap for Semiconductors, 2009 Edition, (2012, Nov.) [Online], Available: <http://public.itrs.net/>.
- [48] “Special Issue on Nonlinear-Optical Signal Processing”, *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, Vol. 16, 2008.
- [49] R.S. Tucker, R. Parthiban, J. Baliga, K. Hinton, R.W.A. Ayre, and W.V. Sorin, “Evolution of WDM Optical IP Networks: A Cost and Energy Perspective”, *J. Lightw. Technol.*, Vol. 27, No. 3, pp. 243-252, Feb. 2009.
- [50] Minnesota Internet Traffic Studies. (2012, Nov.). [Online]. Available: <http://www.dtc.umn.edu/mints/home.php>

- [51] M.Z.H. Feng, K. Ayre, and R.S. Tucker, “Reducing NGN Energy Consumption with IP/SDH/WDM”, presented at the Int. Conf. Energy-Efficient Comput. Netw., Univ. Passau, Germany, 2010.
- [52] J. Baliga, R.W.A. Ayre, K. Hinton, and R.S. Tucker, “Green Cloud Computing: Balancing Energy in Processing, Storage, and Transport”, Proc. IEEE, Vol. 99, No. 1, pp. 149-167, Jan. 2011.