

UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE  
CENTRO DE ENGENHARIA ELÉTRICA E INFORMÁTICA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA



Universidade Federal  
de Campina Grande

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

*Análise da eficiência energética de redes de  
telecomunicações*

**Augusto de Holanda Barreto Martins Tavares**

Campina Grande - PB  
Maio de 2016

AUGUSTO DE HOLANDA BARRETO MARTINS TAVARES

*Análise da eficiência energética de redes de telecomunicações*

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à Unidade Acadêmica de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Bacharel em Ciências no Domínio da Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Telecomunicações

Prof. Dr. José Ewerton P. de Farias  
Orientador

Campina Grande - PB  
Maio de 2016

AUGUSTO DE HOLANDA BARRETO MARTINS TAVARES

*Análise da eficiência energética de redes de telecomunicações*

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à Unidade Acadêmica de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Bacharel em Ciências no Domínio da Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Telecomunicações

Aprovado em:            /            /

---

Prof. Dr. José Ewerton P. de Farias  
Universidade Federal de Campina Grande  
Orientador

---

Universidade Federal de Campina Grande  
Avaliador

Campina Grande - PB  
Maio de 2016

*“The most exciting phrase to hear in science, the one that heralds new discoveries, is not ‘Eureka!’ but ‘That’s funny...’ ”*

***Isaac Asimov***

# Agradecimentos

Agradeço ao professor José Ewerton pela orientação contínua durante a execução deste trabalho e ao longo de várias disciplinas que muito contribuíram para o meu aprendizado durante o curso e aos demais professores e funcionários do Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande,

Aos meus pais, familiares e amigos, por tornarem possível o que seria impossível sem o seu apoio e compreensão.

Ao meu amor.

# Sumário

<b>Resumo</b>	<b>iii</b>
<b>Abstract</b>	<b>iv</b>
<b>Lista de Figuras</b>	<b>v</b>
<b>Lista de Tabelas</b>	<b>vi</b>
<b>Lista de Siglas e Abreviaturas</b>	<b>vii</b>
<b>1 Introdução</b>	<b>1</b>
1.1 Objetivos . . . . .	1
1.2 Metodologia . . . . .	2
1.3 Cronograma . . . . .	2
<b>2 Revisão bibliográfica</b>	<b>3</b>
2.1 Topologia das redes de telecomunicações modernas . . . . .	3
2.1.1 Camada de Acesso . . . . .	3
2.1.2 Camada de Agregação . . . . .	4
2.1.3 Camada de Núcleo . . . . .	5
2.1.4 A rede móvel de telecomunicações . . . . .	5
2.1.5 Outros elementos da rede de telecomunicações . . . . .	5
2.1.6 A camada legada . . . . .	6
2.2 O consumo de energia elétrica da rede de telecomunicações . . . . .	6
2.2.1 Distribuição do consumo de energia entre os elementos da rede de telecomunicações . . . . .	6
2.2.2 Previsões para o consumo de energia da rede de telecomunicações	7
<b>3 Soluções para o consumo de energia na rede de telecomunicações</b>	<b>10</b>
3.1 Soluções integradas à rede de telecomunicações . . . . .	10
3.1.1 Implementação de sistemas energeticamente eficientes . . . . .	10
3.1.2 Arquitetura de redes energeticamente eficientes . . . . .	11
3.1.3 Planejamento energeticamente eficiente . . . . .	11
3.1.4 Funcionamento por meio de consumo adaptado ao nível do tráfego de dados . . . . .	11
3.2 Soluções externas à rede de telecomunicações . . . . .	14

<b>4</b>	<b>Simulação do modelo de consumo energético adaptado ao nível do tráfego de dados</b>	<b>17</b>
4.1	Parâmetros da simulação . . . . .	17
4.1.1	Modelo nodal da rede utilizado . . . . .	17
4.1.2	Modelo da rede IP/WDM utilizado nos enlaces . . . . .	19
4.1.3	Curva de tráfego . . . . .	20
4.2	Resultados . . . . .	21
<b>5</b>	<b>Conclusão</b>	<b>25</b>
<b>6</b>	<b>Referências</b>	<b>26</b>

# Resumo

Com a crescente expansão da rede de telecomunicações, fruto da adoção em massa das redes IP como principal meio de consumo de informação e meio de transmissão de dados nos últimos anos, a infraestrutura de telecomunicações vem se expandindo rapidamente. Como consequência, esse setor vem consumindo cada vez mais energia, o que motivou trabalhos recentes no sentido de tornar esses sistemas mais eficientes. Neste trabalho é feita uma revisão geral da topologia da rede e são estudadas algumas das soluções propostas para essa questão, dando-se ênfase especial a uma estratégia que adapta o consumo ao tráfego de maneira adaptativa.

Palavras-chave: Telecomunicações, Eficiência energética, Consumo adaptado à carga



# Abstract

With the increasing growth of the telecommunications network, caused by the mass adoption of IP networks as the main channel of information consumption and data transmission in the last years, the telecommunications infrastructure is expanding quickly. As a consequence, this industry has been consuming more and more energy, which has motivated research with the goal of making those systems more energy efficient. In this work a general revision of the network topology is made and some of the proposed solutions for this problem are studied, with emphasis on the load-adaptive model.

Keywords: Telecommunications, Energy efficient systems, Load-adaptive systems

# Lista de Figuras

1	Camadas da rede de telecomunicações. . . . .	3
2	Interligação dos diversos componentes que formam a rede de telecomunicações, para as redes móvel e fixa. . . . .	4
3	Divisão percentual do consumo de cada parte da rede de telecomunicações. <i>Fonte: [2]</i> . . . . .	7
4	Previsão de crescimento para o tráfego IP de 2014 a 2019. <i>Dados: [5]</i> . . . . .	8
5	Tráfego diário no ponto de interconexão da rede AMS-IX para o dia 12 de Maio de 2016. . . . .	12
6	Gráfico da tráfego ao longo do tempo e da capacidade oferecida por um sistema utilizado para exemplificar o modelo de consumo adaptado à carga. . . . .	12
7	Gráfico comparando a capacidade oferecida pelo método de projeto tradicional e por um modelo de consumo adaptado à carga com 2 estágios de comutação. . . . .	14
8	Imagem de uma válvula geotermal liberando o vapor resultante do processo de geração, no CPD da <i>Verne Holdings</i> . . . . .	16
9	Modelo nodal da rede nodal utilizada na simulação, baseada na antiga NSFnet. . . . .	17
10	Modelo de um enlace IP/WDM. . . . .	20
11	Tráfego diário no ponto de interconexão da internet London-IX para o dia 05 de Maio de 2016. . . . .	21
12	Curva normalizada do tráfego no ponto de interconexão da internet em Londres. . . . .	21
13	Curvas do modelo de consumo adaptado à carga para o enlace 1 para 1, 2 e 3 estágios de comutação. . . . .	23
14	Curvas do modelo de consumo adaptado à carga para o enlace 1 para 4 e 5 estágios de comutação. . . . .	23
15	Consumo do enlace 1 em kWh em função do n° de estágios de comutação do modelo de consumo adaptado à carga (10 estágios). . . . .	24
16	Consumo do enlace 1 em kWh em função do n° de estágios de comutação do modelo de consumo adaptado à carga (30 estágios). . . . .	24

# Lista de Tabelas

I	Cronograma proposto . . . . .	2
II	Número de usuários por nó da rede mostrada na Figura 9, em milhões de usuários. . . . .	18
III	Distâncias dos enlaces entre os nós da rede mostrada na Figura 9, em km. . . . .	18
IV	Tabela contendo o tráfego de pico para cada enlace entre os nós da rede mostrada na Figura 9, em Megabits/s. Parte 1 . . . . .	19
V	Tabela contendo o tráfego de pico para cada enlace entre os nós da rede mostrada na Figura 9, em Megabits/s. Parte 2 . . . . .	19
VI	Elementos utilizados na rede e sua potência nominal . . . . .	20
VII	Consumo nominal e custo energético por bit para o enlace 1 para 1, 10 e 30 estágios de comutação no modelo de consumo adaptado à carga. . . . .	22

# Lista de Siglas e Abreviaturas

ADSL - *Asymmetric Digital Subscriber Line*

AGC - *Automatic Gain Control* (Controle Automático de Ganho)

AGS - *Asynchronous Gateway Server* (Servidor Gateway Assíncrono)

BRAS - *Broadband Remote Access Server* (Servidor Remoto de Acesso em Banda larga)

CPD - Centro de Processamento de Dados

DSLAM - *Digital Subscriber Line Access Multiplexer* (Multiplexador de Acesso a Linha Digital do Assinante)

FTTEx - *Fiber To The Exchange*

FTTH - *Fiber To the Home*

GSM - *Global System for Mobile communications* (Sistema Global de Comunicações Móveis)

GPRS - *General Packet Radio Service*

HGW - *Home Gateway*

IAD - *Integrated Access Device* (Dispositivo de Acesso Integrado)

IP - *Internet Protocol*

ISO - *International Standardization Organization*

LEED - *Leadership in Energy and Environmental Design*

LER - *Label Edge Router*

LSR - *Label Switching Router*

LTE - *Long Term Evolution*

MPLS - *Multiprotocol Label Switching*

NMS - *Network Management Systems* (Sistemas de Administração de Rede)

NSFnet - *National Science Foundation Network*

OLT - *Optical Line Terminal* (Terminal de Linha Óptica)

OMUX - *Optical Multiplexing* (Multiplexação Óptica)

PON - *Passive Optical Network* (Rede Óptica Passiva)

PSTN - *Public Switched Telephone Network* (Rede Pública de Telefonia Comutada)

RAN - *Radio Access Network* (Rede de Acesso por Rádio)

SDH - *Synchronous Digital Hierarchy* (Hierarquia Digital Síncrona)

UMTS - *Universal Mobile Telecommunications System* (Sistema Universal de Telecomunicações Móveis)

USGBC *U.S. Green Building Council*

VDSL - *Very-high-bit-rate Digital Subscriber Line*

WDM - *Wavelength Division Multiplexing* (Multiplexação por Divisão de Comprimento de Onda)

# 1 Introdução

Na última década os provedores de serviços de telecomunicações experimentaram um aumento vertiginoso na demanda por capacidade de transmissão de dados, fruto da expansão do acesso à internet e de inovações tecnológicas que permitiram a implementação de conexões de dados mais rápidas, seguras e confiáveis.

Esse aumento exigiu uma expansão acelerada da rede de dados com o objetivo de atender à demanda dos consumidores. Nesse processo, o aspecto do consumo de energia dessas redes foi deixado de lado, uma vez que os sistemas associados à transmissão de informação historicamente apresentavam baixo consumo. Entretanto, como será visto mais adiante, o aumento de capacidade da rede criou uma série de gargalos, tanto no que diz respeito à energia necessária para transmissão dos sinais na rede quanto no que se refere à necessidade de alimentação dos equipamentos que fazem parte de sua infra estrutura[1].

Soluções para esse problema vêm sendo propostas, fruto da necessidade de tornar o sistema como um todo mais eficiente, assim como para entrar em sintonia com a crescente preocupação acerca do impacto ecológico que esse setor causa no meio ambiente.

Esse trabalho visa estudar a topologia das redes de telecomunicações mais comuns utilizadas atualmente e identificar os pontos do sistema onde o consumo é excessivo. Em seguida, serão estudadas soluções para o problema de consumo, dando-se ênfase ao modelo do consumo adaptado à carga. Para o estudo do modelo do consumo adaptado à carga serão utilizados dados obtidos de simulações implementadas em código no MATLAB, ao longo de um estágio realizado concomitantemente no Laboratório de Comunicações (LABCOM) do Departamento de Engenharia Elétrica (DEE) da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG). Será feita uma breve descrição do modelo e das condições utilizadas nas simulações. Também serão estudadas soluções que abordam o problema do consumo a partir de outros ângulos.

## 1.1 Objetivos

- Compreensão dos elementos que compõem uma rede de dados e a maneira como eles se conectam;
- Realização de revisão bibliográfica sobre a topologia das redes de telecomunicações modernas;
- Análise do sistema de telecomunicações sobre a óptica do consumo energético;

- Estudo de soluções integradas à rede de telecomunicações para o problema de consumo energético, com ênfase no consumo adaptado à carga;
- Estudo de soluções não integradas à rede de telecomunicações para o problema de consumo energético.

## 1.2 Metodologia

As atividades desenvolvidas ao longo da realização desse trabalho podem ser divididas em etapas, que estão explicitadas e detalhadas a seguir:

1. Revisão bibliográfica:  
Pesquisa em livros, textos e artigos que disponham sobre a topologia das redes de telecomunicações mais utilizadas atualmente, assim como sobre os equipamentos que as compõem;
2. Estudo da topologia da rede de telecomunicações:  
Análise do sistema e identificação dos pontos da rede que operam de maneira ineficiente quando considerado o consumo energético;
3. Estudo das soluções para o problema do consumo energético da rede de telecomunicações:
4. Utilização dos conhecimentos obtidos da análise do sistema para avaliar as soluções propostas para o problema do consumo energético em redes de telecomunicações, com ênfase para o modelo consumo energético adaptado ao nível de tráfego.

## 1.3 Cronograma

As atividades desenvolvidas ao longo da realização deste trabalho foram realizadas aproximadamente de acordo com o cronograma apresentado na Tabela I.

Tabela I: Cronograma proposto

Atividade	Início	Fim
Revisão bibliográfica	03/03/2016	18/03/2016
Estudo da topologia da rede de telecomunicações	19/03/2016	20/04/2016
Estudo das soluções para o problema do consumo energético	21/04/2016	21/05/2016

## 2 Revisão bibliográfica

### 2.1 Topologia das redes de telecomunicações modernas

As redes de telecomunicações utilizadas atualmente podem ser divididas de várias maneiras, indo de visões mais abrangentes, que abordam apenas os aspectos mais abstratos do sistema, até abordagens que listam sua organização em termos dos dispositivos contidos em uma dada camada. O uso de uma determinada divisão é dependente do uso aplicado. Ainda, é comum que partes distintas de uma dada metodologia de divisão da rede integrem a mesma camada em outra.

Considerando esses fatores, a abordagem utilizada aqui será baseada na imagem demonstrada na Figura 1, em que a rede é dividida em três camadas: Acesso, Agregação e Núcleo. Os componentes que integram cada uma dessas camadas são exibidos na Figura 2. Suas conexões dentro das camadas serão descritas com mais detalhes a seguir. É importante notar que há uma diferenciação entre as camadas para a rede móvel e para a rede fixa.

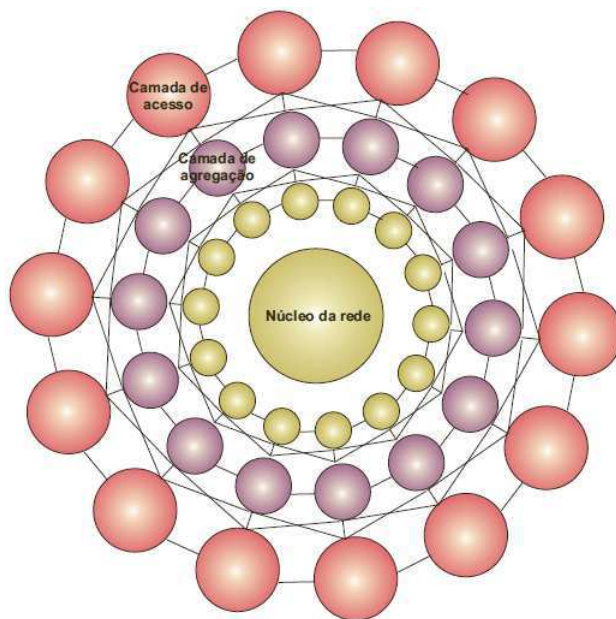


Figura 1: Camadas da rede de telecomunicações.

#### 2.1.1 Camada de Acesso

É a camada a partir de onde o usuário acessa a rede, divididos entre consumidores fixos e móveis. Os usuários móveis acessam a rede por meio de dispositivos como *smartphones* e *tablets*, e fazem uso da rede acesso móvel, como pode ser visto na Figura 2. Os usuários fixos acessam a rede por intermédio de dispositivos mais



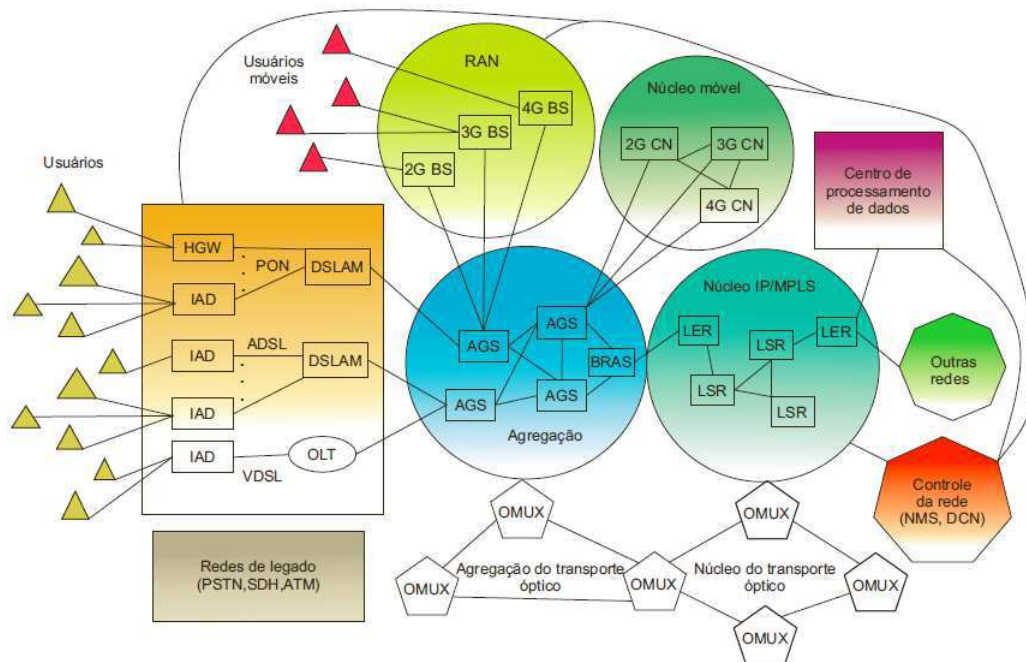


Figura 2: Interligação dos diversos componentes que formam a rede de telecomunicações, para as redes móvel e fixa.

tradicionais como *desktops* e linhas de telefone fixo, e são também divididos entre usuários residenciais e comerciais. Essa distinção é importante, pois um usuário residencial possui necessidades diferentes de horário de disponibilidade do serviço e capacidade de acesso quando comparado ao usuário comercial. Esses usuários acessam a rede por meio de dispositivos de acesso integrado (*IAD - Integrated Access Device*) ou *HGWs (Home Gateway)*, e podem fazer uso tanto de *FTTEx (Fiber To The Exchange)* como de *FTTCab (Fiber To The Cabinet)* associados a diferentes formas da tecnologia *DSL (Digital Subscriber Line)*. O acesso por meio de *FTTH (Fiber To The Home)* faz uso de uma rede óptica passiva (*PON - Passive Optical Network*), formada por *OLTs (Optical Line Terminal)* e *ONTs (Optical Network Terminal)*, formando uma *URA (Unidade de Rede de Acesso)*.

### 2.1.2 Camada de Agregação

A camada de agregação é formada por uma plataforma *Ethernet* montada sobre uma rede de transporte óptico baseada em multiplexação por divisão de comprimento de onda (*WDM - Wavelength Division Multiplexing*), em conjunto com os sistemas de *OMUX (Optical Multiplexing)* associados. O servidor de acesso remoto em banda larga (*BRAS - Broadband Remote Access Server*) é o componente da camada de agregação responsável por realizar a transição para a camada de núcleo.

### 2.1.3 Camada de Núcleo

Essa camada é formada por uma plataforma IP/MPLS (*Internet Protocol/Multiprotocol Label Switching*), constituída de LERs (*Label Edge Routers*) e LSRs (*Label Switch Routers*), interconectados por uma rede de transporte óptica baseada em multiplexação por divisão de comprimento de onda e os sistemas de OMUX associados.

É visível que, entre as diversas camadas, a de acesso apresenta a maior complexidade em termos de possíveis componentes e configurações, uma vez que sua arquitetura é dependente do perfil do usuário, que pode variar de acordo com a região, condições de acesso, entre outras circunstâncias. Em contraste, as camadas de agregação e acesso tendem a apresentar uma estrutura mais uniforme.

### 2.1.4 A rede móvel de telecomunicações

A rede móvel de telecomunicações começa na rede de acesso via rádio, que engloba diferentes padrões de acesso:

- GSM (*Global System for Mobile communications*) e GPRS (*GSM/General Packet Radio Service*), que formam a segunda geração de padrões de acesso móvel(2G);
- UMTS (*Universal Mobile Telecommunications System*), que forma a terceira geração de padrões de acesso móvel(3G);
- Tecnologia LTE (*Long Term Evolution*) e LTE-A (*LTE-Advanced*), que formam a quarta geração de padrões de acesso móvel(4G).

Esses diferentes padrões estão conectados às suas respectivas estações rádio base, que, por sua vez, utilizam a camada de agregação para se conectar aos elementos do núcleo da rede móvel, de acordo com a tecnologia utilizada.

### 2.1.5 Outros elementos da rede de telecomunicações

Existem elementos associados à rede de telecomunicações que não estão associados exclusivamente a nenhuma das camadas. Entre eles está o sistema de administração de rede (*NMS - Network Mananement System*), responsável pelas operações necessárias para a operação confiável tanto da rede fixa quanto da rede móvel. Esse sistema é interligado aos diversos pontos da rede por meio de uma rede de comunicação de dados (*DCN - Data Communication Network*) separada. Outro

elemento que se encaixa nessa categoria são os centros de processamento de dados (CPDs). Eles se dividem entre realizar funções de suporte na operação da rede e prover serviços aos usuários como conteúdo de áudio, vídeo, espaço de armazenamento, etc.

### **2.1.6 A camada legada**

Essa camada é analisada em separado por ser formada por tecnologias que tendem a ter uma participação cada vez menor dentro da rede, sendo substituídas por soluções mais modernas. Seu componente mais importante é a rede de telefonia pública comutada (*PSTN - Public Switched Telephone Network*), que oferece o serviço de telefonia para usuários residenciais e comerciais, e que ainda usa uma hierarquia digital síncrona (*SDH - Synchronous Digital Hierarchy*) como padrão de transporte. O padrão SDH será gradativamente substituído por um novo padrão de transporte baseado em uma rede óptica de transporte (*OTN - Optical Transport Network*).

## **2.2 O consumo de energia elétrica da rede de telecomunicações**

### **2.2.1 Distribuição do consumo de energia entre os elementos da rede de telecomunicações**

O consumo de energia estimado para uma provedora de serviços de telecomunicações em um país de europeu típico é de 3TWh por ano[1], levando em consideração tanto o equipamento que integra a infraestrutura da empresa quanto os dispositivos dos usuários. A Figura 3 mostra o quanto cada segmento da rede contribui para o seu consumo total.

Uma primeira observação a ser feita acerca da Figura 3 é que aproximadamente 80% do consumo total é dividido entre a camada legada e a camada de acesso, tanto móvel quanto fixo. Como a parcela da camada legada tende a diminuir com o tempo, a tendência é que nos próximos anos um percentual cada vez maior do consumo venha da camada de acesso.

Uma consequência dessa distribuição do consumo é também o fato de que a medição do impacto de um elemento no consumo da rede é um problema não trivial, uma vez que para a camada de acesso os dispositivos empregados são extremamente heterogêneos, e para as demais camadas a natureza fortemente interconectada da rede leva a instalações e equipamentos que são compartilhados entre diversas cama-

das.

Uma consideração final deve ser feita sobre a estimativa do consumo proveniente dos usuários da rede. Eles são tipicamente agrupados em uma de três categorias:

- *Single play*: Apenas um tipo de serviço é fornecido pela rede, como uma linha telefônica;
- *Double play*: Dois serviços são fornecidos, como uma linha telefônica e uma conexão via DSL.
- *Triple Play*: Três serviços são oferecidos: linha telefônica, conexão com a internet e um serviço de televisão

Após determinada a parcela de cada tipo de usuário do sistema, o consumo é estimado atribuindo um conjunto de dispositivos como *desktops* e *tablets*, entre outros, para cada usuário. Para clientes comerciais o consumo é estimado de acordo o número e o tipo de escritórios e locais de trabalho onde o serviço está sendo oferecido.

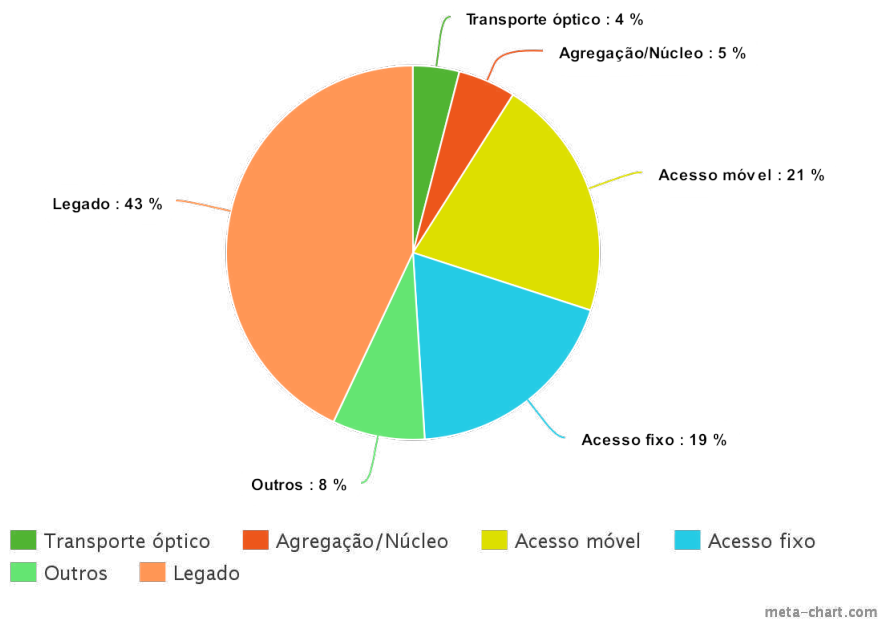


Figura 3: Divisão percentual do consumo de cada parte da rede de telecomunicações. Fonte: [2].

### 2.2.2 Previsões para o consumo de energia da rede de telecomunicações

Tradicionalmente, o consumo de energia dos sistemas responsáveis por prover os serviços de telecomunicações foi um fator desconsiderado graças ao baixo

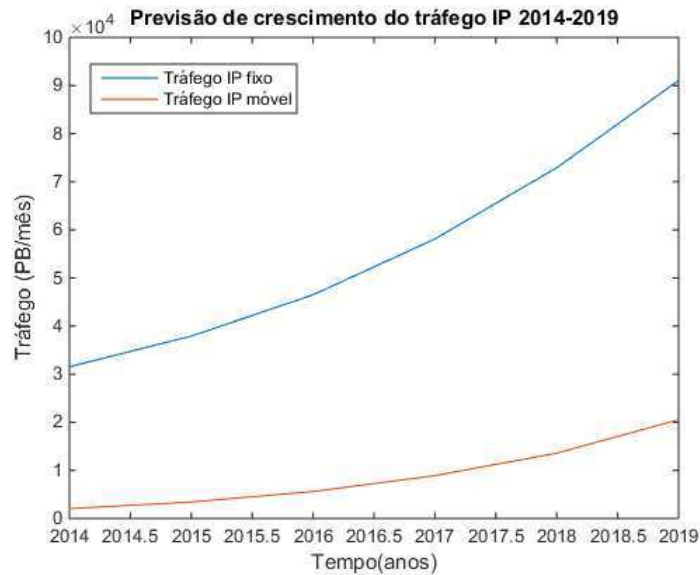


Figura 4: Previsão de crescimento para o tráfego IP de 2014 a 2019. *Dados: [5].*

consumo energético desses sistemas quando comparados a outras aplicações comerciais. Entretanto, recentemente, esse fator vem se tornando significativo no projeto e otimização das redes devido a uma gama de fatores.

O primeiro é que o consumo da rede se tornou parte significativa do consumo total de energia da maioria dos países, constituindo cerca de 1% a 2% do consumo de energia para os países com acesso a banda larga [1], valor equivalente ao setor de aviação comercial. Como pode ser visto na Figura 4, o tráfego na rede tende a aumentar de maneira exponencial nos próximos anos. O número de dispositivos conectados a redes IP será três vezes maior que a população mundial em 2019 [5]. Entretanto, os avanços na capacidade de processamento dos dispositivos eletrônicos necessários para o aumento de capacidade da rede segue um ritmo de crescimento mais moderado, o que implica uma inevitável expansão da infraestrutura instalada para atender à demanda, levando a um aumento da contribuição do sistema de telecomunicações para o consumo energético total dos países com acesso a banda larga.

O problema da expansão do tráfego vem atrelado a um outro fator, que é a necessidade por mais banda para o processo de transmissão de dados a longas distâncias. Com o objetivo de suprir essa necessidade, diversas técnicas de modulação e transmissão são empregadas e muitas vezes o aumento da potência do sinal transmitido é utilizado como solução para suas limitações. Isso resulta em dispositivos de recepção que demandam cada vez mais e mais energia.

Do ponto de vista da engenharia, esse aumento previsto do consumo é preocupante, principalmente quando aliado ao fato de que a rede de telecomunicações tende a gerar pontos de consumo concentrados, uma vez que a maior parte da energia é

gasta nos pontos de transmissão e recepção. Esses fatores impactam diretamente no gerenciamento da dissipação da energia térmica em CPDs (*Datacenters*) e pontos de comutação da rede, que atualmente já exigem uma infraestrutura de resfriamento significativo.

Existe ainda o aspecto ecológico, que vem se tornando cada vez mais importante com a crescente preocupação da sociedade com questões ambientais. Na medida em que iniciativas baseadas em energias renováveis avançam, existe uma pressão para que cada vez mais as instalações de uma indústria atendam a padrões rigorosos de regulação ambiental. Assim, é fundamental a concepção e o projeto de redes eficientes, uma vez que a reforma de redes pré-existentes tende a ter um custo elevado e trazer a tona dificuldades que não precisam ser consideradas na fase de projeto.

## 3 Soluções para o consumo de energia na rede de telecomunicações

### 3.1 Soluções integradas à rede de telecomunicações

Neste tópico serão abordadas as soluções para o problema de consumo de energia que podem ser implementadas dentro do próprio sistema da rede, com ênfase especial para o modelo de consumo energético adaptado ao nível do tráfego de dados. A redução do consumo de energia em uma rede de telecomunicações é uma tarefa complexa, uma vez que a otimização do uso de energia em uma parte da rede pode levar ao aumento do consumo ou perda de qualidade em outra. Habitualmente, soluções que levem em consideração a melhora da rede como um todo apresentam performance superior quando comparadas a várias soluções que trabalham em pontos específicos da rede em conjunto. Ainda, há um compromisso a ser feito entre a qualidade do serviço e o consumo de energia[9].

#### 3.1.1 Implementação de sistemas energeticamente eficientes

À medida que as tecnologias que constituem os componentes da rede avançam, é natural que eles se tornem mais eficientes do ponto de vista energético, seja por consumir, seja por prover mais capacidade para um mesmo consumo. Esse é um método que pode ter um impacto dramático no consumo da rede, uma vez que ele implica a substituição de equipamentos, e, como pode ser visto na Figura 3, a parte de legado é responsável pela maior parcela da demanda de energia do sistema. Entretanto, essa alternativa possui dois obstáculos notáveis em nível prático:

- A resistência das provedoras de serviço em substituir os equipamentos antes que eles sejam completamente depreciados e de realizar melhorias do sistema antes do momento em que a qualidade do serviço antinja níveis abaixo do esperado, uma vez que novas tecnologias surgem relativamente rápido;
- Os custos de manter o sistema constantemente a par das inovações são elevados;

Esse segundo fator gera um terceiro problema, que é a necessidade de que os novos sistemas sejam retrocompatíveis com aqueles já instalados, uma vez que normalmente apenas algumas partes da rede são substituídas de cada vez.

### **3.1.2 Arquitetura de redes energeticamente eficientes**

A maneira como os elementos da rede se conectam e interagem entre si possui influência sobre o custo energético por bit de informação transmitido. Um exemplo simples é o caso em que um ponto da rede tem mais de um caminho disponível para enviar informação a um outro ponto. Nesse caso, uma rede com uma arquitetura eficiente do ponto de vista energético garantiria que a opção com o menor custo fosse escolhida. Existem outras considerações dentro desse tópico, como a localização dos dados a serem consumidos, que podem ser alocados de forma distribuída ou concentrada de acordo com as necessidades de cada caso.

### **3.1.3 Planejamento energeticamente eficiente**

Essa solução trabalha de maneira a alocar os recursos de uma rede pré-existente da maneira mais eficiente possível, gerenciando a alocação de recursos entre os diferentes pontos da rede, incluindo o gerenciamento da capacidade que a rede oferece aos usuários de acordo com a demanda.

Já existem iniciativas que visam fornecer alternativas para a implementação desta e das demais soluções aqui citadas, como a GreenTouch[16], que desde 2015 trabalha com novas tecnologias, arquiteturas e especificações com o objetivo de tornar a rede 1000 vezes mais energeticamente eficiente quando comparada aos seus dados em 2010. Essa iniciativa já conta com membros como a Huawei, Bell Labs e Fujitsu, entre outros.

### **3.1.4 Funcionamento por meio de consumo adaptado ao nível do tráfego de dados**

Tradicionalmente, uma rede de telecomunicações é planejada de modo a fornecer a todo momento uma capacidade de acesso fixa aos seus usuários. Essa capacidade projetada geralmente corresponde ao máximo mensurado para aquela rede específica, após um estudo do histórico de uso da rede para o caso em questão, acrescido de uma margem de segurança destinada a manter o serviço operando no caso de anomalias.

Entretanto, como pode ser observado na Figura 5, que mostra o tráfego no ponto de interconexão da internet localizado em Amsterdam, o tráfego tende a variar drasticamente entre um momento e outro, o que significa que, na maior parte do tempo, o sistema possui capacidade ociosa, resultando em dispositivos e recursos da rede que estão ativos sem necessidade. O mesmo comportamento pode ser observado para a rede móvel. Essas variações são explicadas pelos padrões de comportamento humanos. Por exemplo, há uma queda vertiginosa no tráfego da Figura 5 após 22h00,



horas pois a maioria das pessoas dorme nesse horário. O pico pode ser associado com o consumo residencial, após o horário de trabalho, de serviços de *streaming*, entre outros, que exigem um alto volume de dados.

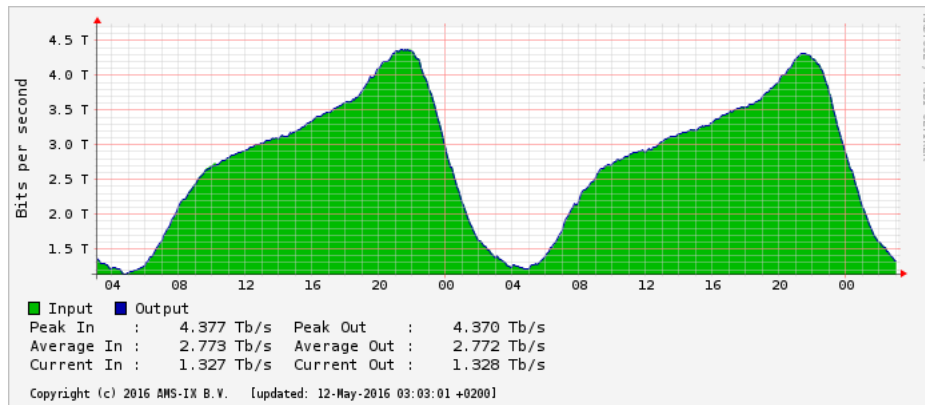


Figura 5: Tráfego diário no ponto de interconexão da rede AMS-IX para o dia 12 de Maio de 2016.

O modelo de consumo adaptado à carga visa explorar esse comportamento do tráfego, fazendo com que a curva de capacidade oferecida acompanhe as variações, aproveitando os recursos do sistema de maneira mais eficiente. A modelagem matemática do problema é simples. Considere que na Figura 6 a curva  $a(t)$ , em azul, representa o tráfego ao longo do intervalo de tempo  $T$ , onde  $A$  é o pico de tráfego, e a curva  $b(t)$ , em vermelho, expressa a capacidade de tráfego oferecida pelo sistema.

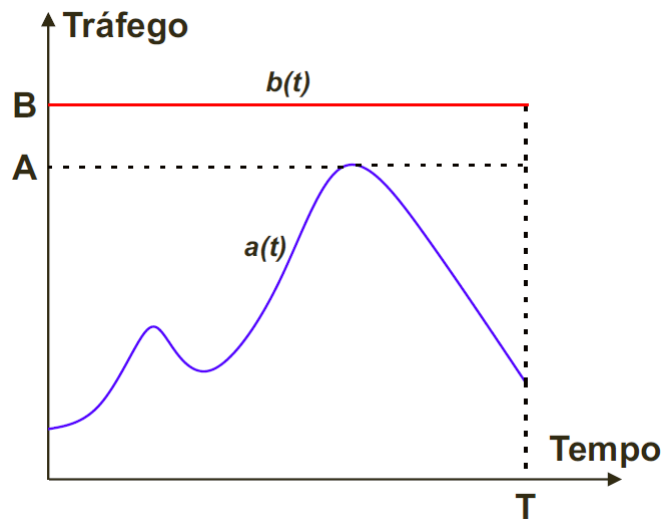


Figura 6: Gráfico da tráfego ao longo do tempo e da capacidade oferecida por um sistema utilizado para exemplificar o modelo de consumo adaptado à carga.

Há uma função a partir da qual podemos relacionar o tráfego e a capacidade, como pode ser visto na Equação 1. Essa função pode assumir diversas formas, mas, idealmente, a relação é uma proporcionalidade direta, caso que será abordado neste trabalho. A expressão para esse caso pode ser vista na Equação 2.

$$b(t) = \omega(a(t)) \quad (1)$$

$$b(t) = K \times a(t) \quad (2)$$

Como já foi dito, é uma prática usual da indústria que a capacidade oferecida seja constante, correspondendo ao máximo do tráfego acrescido de uma pequena folga, que corresponde ao caso mostrado na Figura 6. A expressão que explicita esse comportamento para a capacidade oferecida pode ser vista na Equação 3.

$$b(t) = B = \max(a(t)) + b_{reserva} = A + b_{reserva} \quad (3)$$

Em um modelo de consumo adaptado à carga ideal, a curva de capacidade oferecida acompanharia as variações da curva de tráfego momento a momento. Entretanto, graças a diversas restrições práticas, isso não é possível. Assim, usualmente definem-se  $B_n$  níveis discretos de capacidade entre os quais o sistema comuta de acordo com a demanda da rede, como pode ser visto na Equação 4.

$$b(t, t+k) = B_n \forall a(t, t+k) \in (C_n, C_{(n-1)}) \quad (4)$$

$$n = 0, 1, \dots, N$$

O  $k$  define o período de validade de uma dada configuração da rede, o que corresponde ao período de tempo no qual um dado nível  $B_n$  de capacidade é válido.  $C$  corresponde aos  $N - 1$  limites que definem os pontos em que a capacidade da rede é comutada de um estágio atual para um estágio acima ou abaixo. O funcionamento do sistema ocorre da seguinte maneira: a capacidade  $b(t)$  é alternada para um estágio  $B_n$  quando é previsto que o tráfego  $a(t, t+l)$  esteja dentro do intervalo  $(C_n, C_{(n-1)})$  durante o período de tempo  $(t, t+k)$ . Dessa maneira, o método tradicional de projeto da capacidade do sistema pode ser expresso como um modelo de consumo adaptado à carga no qual há apenas um nível  $B$  de capacidade possível.

Assumindo uma relação linear entre a energia consumida pelo sistema e a capacidade oferecida, a expressão para o consumo  $E(t)$  do sistema pode ser vista na Equação 5, onde  $D$  expressa o custo energético por bit em  $J/bit$ . Esse fator é obtido a partir das tecnologias utilizadas nos sistemas que compõem a rede, e é um parâmetro que expressa a sua eficiência.

$$E(t) = D \times b(t) \quad (5)$$

Por fim, o consumo de energia da rede para um dado período de tempo  $F(t)$

pode ser obtido a partir da Equação 6. A economia proporcionada entre o modelo normal e um modelo de consumo adaptado à carga com 2 estágios de comutação seria a diferença entre a integral das curvas  $b_1(t)$  e  $b_2(t)$  mostradas na figura 7.

$$F(t) = \int_0^T E(t)dt \quad (6)$$

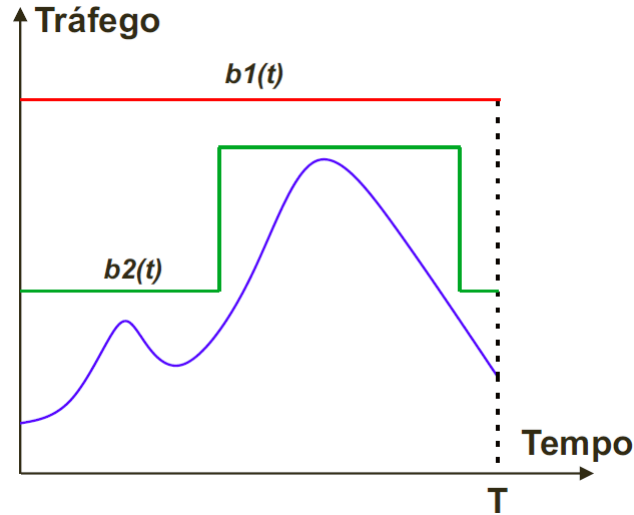


Figura 7: Gráfico comparando a capacidade oferecida pelo método de projeto tradicional e por um modelo de consumo adaptado à carga com 2 estágios de comutação.

Há diversas condições que devem ser observadas para que uma rede possa operar em regime de consumo adaptado à carga, que correspondem às limitações práticas as quais seus elementos devem se adequar. São elas:

- Os componentes da rede devem ser compatíveis com um regime de operação no qual eles alternam entre um estado ativo e um estado inativo de maneira dinâmica, tanto em termos de *hardware* como em termos de *software*;
- O nível de capacidade oferecido é determinado pela previsão do tráfego para um certo intervalo de tempo. Assim, é necessário que haja um monitoramento constante do tráfego e a capacidade de prever a demanda com a precisão necessária;

### 3.2 Soluções externas à rede de telecomunicações

A questão da eficiência energética do sistema de telecomunicações também diz respeito ao desempenho dos sistemas associados que prestam suporte ao funcionamento da rede, como a alimentação das instalações onde ficam localizados os equipamentos que a compõem. Assim, é possível abordar o problema de melhora

do desempenho da rede de maneira mais tradicional, visando a economia de energia elétrica desses sistemas.

Há diversos trabalhos sendo publicados sobre o tema de eficiência energética para construções de maneira geral, mas entre esses há uma categoria que se destaca quando se mencionam redes de telecomunicações: o sistema de resfriamento dos CPDs.

Com o aumento da demanda por capacidade de transmissão, os dispositivos eletrônicos envolvidos no processo de armazenamento de dados, conversão analógico-digital, transmissão e recepção de sinais, entre outros, vem consumindo cada vez mais potência[13]. Como um CPD concentra múltiplos desses dispositivos em um único prédio, o aumento da potência dissipada na forma de calor decorrente dessa tendência vem se tornando uma preocupação cada vez maior para os envolvidos na administração desses locais[10], uma vez que os dispositivos eletrônicos a semi-condutor operam apenas dentro de um certo intervalo de temperatura.

Assim, faz-se necessário o uso de sistemas de resfriamento e ventilação. Tipicamente esses sistemas se baseiam na circulação de um fluido resfriante, que pode ser o próprio ar, água ou compostos químicos apropriados, que circula por um sistema proporcionando a diminuição da temperatura do CPD ao absorver calor e liberá-lo em outro ambiente. Entretanto, esses sistemas são extremamente custosos do ponto de vista energético[11], de maneira que sua alimentação assume um lugar central tanto para a confiabilidade da rede, uma vez os CPDs recebem grande parte do tráfego, quanto para os custos operacionais do sistema em si.

Assim, recentemente, várias iniciativas surgiram para tentar contornar esse problema, aproveitando a tendência recente de usar de fontes de energia renovável, cortar gastos e tornar estruturas mais autossuficientes. Uma das soluções propostas para contornar esse problema é o uso de resfriamento geotermal[12]. Em termos simples, existem camadas do subsolo que apresentam baixa temperatura natural, e o objetivo é aproveitar esse fenômeno para reduzir o consumo de energia com refrigeração. Há duas possibilidades para aproveitar esse fenômeno:

- O uso de uma estrutura de canos com água e/ou fluido de resfriamento em um sistema em que eles circulam entre a camada fria do solo e o local que se deseja resfriar;
- A construção da estrutura em si no subsolo. Nessa alternativa, é possível ainda economizar nos custos de construção utilizando estruturas antigas em desuso, como *bunkers* militares desativados.

Um exemplo de projeto que utiliza essas soluções é o *datacenter* do *American College Center*, na cidade de Iowa, nos Estados Unidos. Uma outra aplicação

que utiliza a energia geotermal de maneira diferente é um projeto desenvolvido na Islândia pela companhia *Verne Holdings*, utilizada por empresas como a BMW para a realização de processamento computacional de alto desempenho. Como a Islândia está geograficamente localizada em uma região onde há muitos vulcões ativos, o solo possui uma temperatura anormalmente elevada. O projeto tem como intuito captar essa temperatura para a geração de energia elétrica, que por sua vez seria utilizada para alimentar sistemas de refrigeração tradicionais. Uma imagem de um CPD da *Verne Holdings* liberando vapor proveniente do processo de geração geotérmica pode ser visto na Figura 8.



Figura 8: Imagem de uma válvula geotermal liberando o vapor resultante do processo de geração, no CPD da *Verne Holdings*.

Como estímulo para que as empresas do setor privado façam a transição para CPDs que adotem meios de energia renováveis como sua principal fonte de alimentação, diversas organizações vêm fornecendo certificados atestando que uma dada instalação atende a uma série de pré-requisitos que a tornam energeticamente eficiente. No âmbito mundial, destacam-se o LEED (*Leadership in Energy and Environmental Design*), concedido pelo USGBC (*U.S. Green Building Council*) Unidos, assim como as especificações ISO 50001 e 14001, estabelecidas pela ISO (*International Standardization Organization*).

## 4 Simulação do modelo de consumo energético adaptado ao nível do tráfego de dados

Essa seção visa explorar os resultados de uma simulação realizada a partir do modelo desenvolvido no estágio realizado concomitantemente a este trabalho, que resultou em código para MATLAB, tomando como exemplo o comportamento de uma rede funcionando com e sem consumo adaptado à carga do ponto de vista de seu consumo energético. Os parâmetros da simulação serão explicados de maneira simplificada neste trabalho. Uma explicação mais abrangente sobre o processo de decisão que levou a metodologia adotada na simulação poderá ser encontrada no relatório de estágio.

### 4.1 Parâmetros da simulação

#### 4.1.1 Modelo nodal da rede utilizado

O modelo utilizado pode ser visto na Figura 9. Essa topologia foi obtida da estrutura da NSFnet (*National Science Foundation Network*), que foi um projeto instituído com o objetivo de estabelecer uma rede de alta velocidade entre as principais cidades dos Estados Unidos da América com objetivos educacionais e científicos. Ela funcionou de 1985 até 1995.

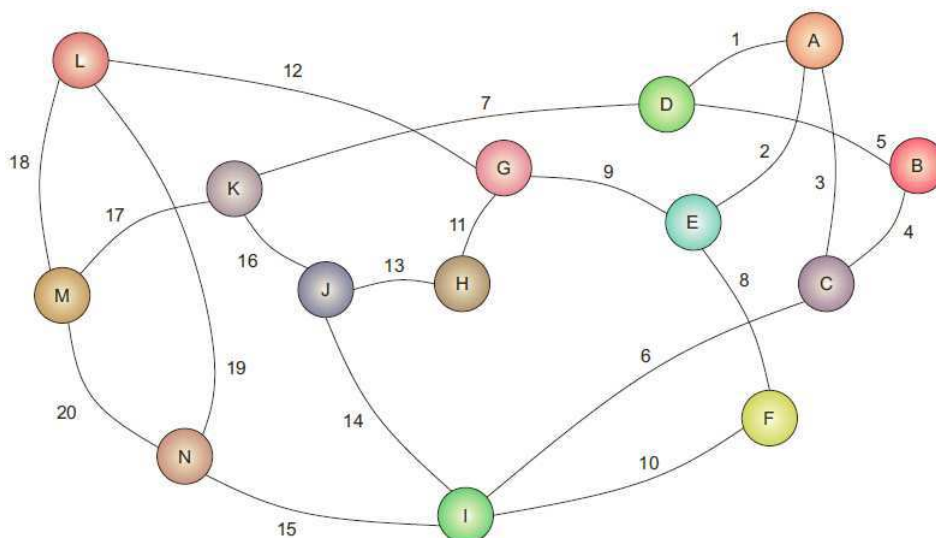


Figura 9: Modelo nodal da rede nodal utilizada na simulação, baseada na antiga NSFnet.

Os parâmetros relevantes para a simulação a serem obtidos a partir da estrutura do modelo são:

- Tráfego de pico para cada conexão de cada nó da rede;

- Número de usuários por nó da rede;
- Distâncias correspondentes a cada enlace da rede;
- As conexões entre cada nó.

O número de usuários por nó foi obtido utilizando aproximadamente o número de habitantes dos estados dos Estados Unidos da América onde ficavam localizados os nós na NSFnet. Os valores utilizados podem ser encontrados na Tabela II.

Tabela II: Número de usuários por nó da rede mostrada na Figura 9, em milhões de usuários.

Nó	A	B	C	D	E	F	G
Nº de usuários	8	8,9	0,67	9	12	10	13
Nó	H	I	J	K	L	M	N
Nº de usuários	2,9	27	5	3	7	20	20

As distâncias para cada enlace foram obtidas a partir da distância geográfica entre os estados dos Estados Unidos da América onde ficavam localizados os nós na NSFnet. Os valores utilizados podem ser encontrados na Tabela III

Tabela III: Distâncias dos enlaces entre os nós da rede mostrada na Figura 9, em km.

Enlace	1	2	3	4	5
Distância(km)	800	500	400	250	900
Enlace	6	7	8	9	10
Distância(km)	2000	2000	1000	900	1400
Enlace	11	12	13	14	15
Distância(km)	900	2500	500	1000	1600
Enlace	16	17	18	19	20
Distância(km)	500	900	800	1500	900

As Tabelas IV e V expressam as conexões de cada nó em forma de matriz, assim como o seu tráfego de pico. Os dados de tráfego foram obtidos em [6]. Por simplicidade, as seguintes considerações foram feitas para a montagem da matriz:

- O tráfego de cada nó é proveniente unicamente de suas conexões imediatas. O tráfego proveniente das demais conexões foi considerado como estando já adicionado ao tráfego de suas conexões imediatas;
- O tráfego para cada enlace foi considerado simétrico para os dois sentidos, o que resulta em uma matriz simétrica em relação à sua diagonal principal.

Tabela IV: Tabela contendo o tráfego de pico para cada enlace entre os nós da rede mostrada na Figura 9, em Megabits/s. Parte 1

	A	B	C	D	E	F	G
A	0	0	586,4	1881,2	351,2	0	0
B	0	0	614,9	464	0	0	0
C	586,4	614,9	0	0	0	0	0
D	1881,2	464	0	0	0	0	0
E	351,2	0	0	0	0	352,2	542,4
F	0	0	0	0	352,2	0	0
G	0	0	0	0	542,4	0	0
H	0	0	0	0	0	0	863
I	0	0	282,9	0	0	84,3	0
J	0	0	0	0	0	0	0
K	0	0	0	45	0	0	0
L	0	0	0	0	0	0	132,9
M	0	0	0	0	0	0	0
N	0	0	0	0	0	0	0

Tabela V: Tabela contendo o tráfego de pico para cada enlace entre os nós da rede mostrada na Figura 9, em Megabits/s. Parte 2

	H	I	J	K	L	M	N
A	0	0	0	0	0	0	0
B	0	0	0	0	0	0	0
C	0	282,9	0	0	0	0	0
D	0	0	0	45	0	0	0
E	0	0	0	0	0	0	0
F	0	84,3	0	0	0	0	0
G	863	0	0	0	132,9	0	0
H	0	0	195,9	0	0	0	0
I	0	0	30,2	0	0	0	30,5
J	195,9	30,2	0	30,5	0	0	0
K	0	0	30,5	0	0	55,2	0
L	0	0	0	0	0	238,4	104,1
M	0	0	0	55,2	238,4	0	542,3
N	0	30,5	0	0	104,1	542,3	0

#### 4.1.2 Modelo da rede IP/WDM utilizado nos enlaces

Uma das tarefas mais complexas ao tentar simular um enlace pertencente a uma rede de telecomunicações é a elaboração de um modelo que possa expressar seus



componentes de maneira condizente com a prática, uma vez que a grande maioria das redes são bastante heterogêneas. Tendo isso em mente, os enlaces da rede da Figura 9 foram modelados de acordo com o esquema representado na Figura 10, que mostra o modelo de um enlace IP/WDM.

A partir desse modelo, e tendo em vista os dados contidos em [7], os elementos contidos na Tabela VI foram escolhidos para constituir a rede. Foram considerados usuários *triple play*, utilizando 2 *notebooks* e 2 *smartphones* em conjunto com um roteador.

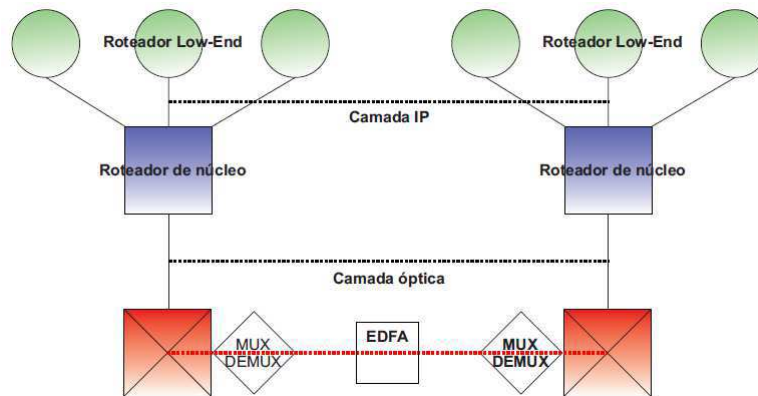


Figura 10: Modelo de um enlace IP/WDM.

Tabela VI: Elementos utilizados na rede e sua potência nominal

<i>Low-end router</i>	Linksys E4200	24W
<i>Core router</i>	Cisco NCS 6008 Single-Chassis System	3.520W
Fibra	N/A	1W/km
<i>Notebook</i>	Dell Latitude E6239	65W
Carregador de celular	Power Integrations 3.6W TNY266P	3,6W

#### 4.1.3 Curva de tráfego

A curva com o comportamento do tráfego escolhida foi obtida a partir do tráfego no ponto de interconexão da internet localizado em Londres. A curva original pode ser vista na Figura 11, e a curva utilizada para os enlaces pode ser vista na Figura 12. A curva da Figura 12 foi obtida amostrando a curva da Figura 11 de 30 em 30 minutos, e foi normalizada para poder se adequar a qualquer um dos enlaces de acordo com os dados de tráfego de pico contidos nas Tabelas IV e V.

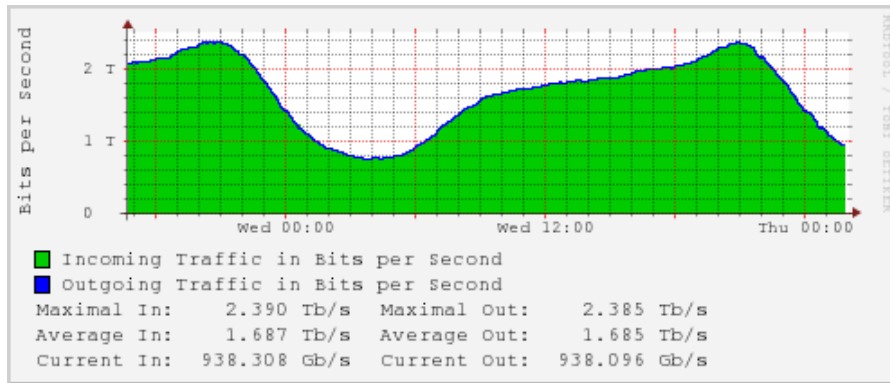


Figura 11: Tráfego diário no ponto de interconexão da internet London-IX para o dia 05 de Maio de 2016.

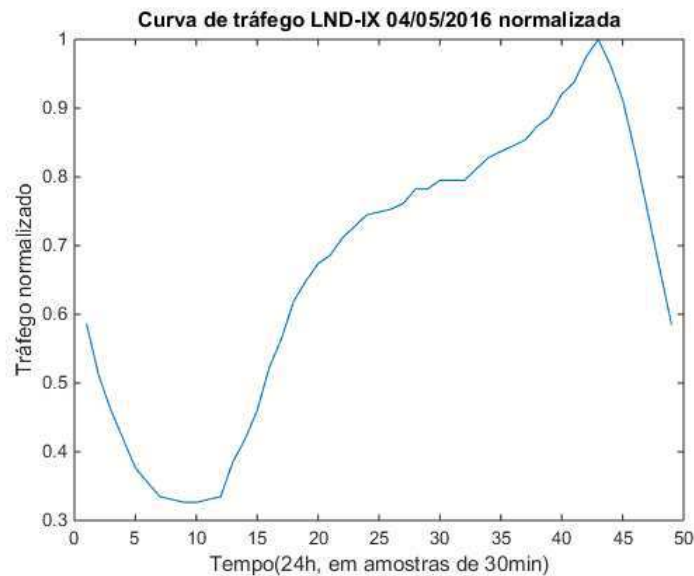


Figura 12: Curva normalizada do tráfego no ponto de interconexão da internet em Londres.

## 4.2 Resultados

Os resultados da simulação do modelo de consumo adaptado à carga para o enlace 1 da Figura 9 podem ser vistos nas Figuras 13 e 14. Essas figuras mostram as curvas para apenas 5 estágios de comutação, para facilitar a leitura dos gráficos. O pico que pode ser visto no início do gráfico para 5 estágios de comutação da Figura 14 é fruto da maneira como o código de MATLAB define o nível da curva a partir da curva de tráfego. Embora ele gere uma pequena imprecisão no cálculo do consumo, ela pode ser desconsiderada, uma vez que, como será visto mais à frente, o comportamento do consumo pelo número de estágios de comutação atendeu ao que era esperado.

Foi obtida a curva do consumo do sistema em relação ao número de estágios de comutação do modelo de consumo adaptado à carga, com 10 estágios de comutação,

que pode ser vista na Figura 15. O mesmo gráfico para 30 estágios de comutação pode ser visto na Figura 16. A partir dessas figuras, vemos que o sistema adquire um comportamento de saturação à medida que o número de estágios aumenta, o que indica que para um número elevado de estágios a diferença no consumo entre duas curvas será irrisória, e isso está de acordo com a modelagem matemática do modelo de consumo adaptado à carga realizada na seção anterior.

A partir das curvas das Figuras 15 e 16 foram obtidos os dados contidos na Tabela VII. O custo energético por bit é uma medida importante para definir a eficiência do sistema, e é visível que com a introdução do modelo de consumo adaptado à carga há ganhos consideráveis nesse aspecto.

Tabela VII: Consumo nominal e custo energético por bit para o enlace 1 para 1, 10 e 30 estágios de comutação no modelo de consumo adaptado à carga.

	Nominal	10 Estágios	30 Estágios
Consumo do sistema(kWh)	470.056	336.687	310.701
Custo por bit(J/bit)	60,11	43,06	39,8

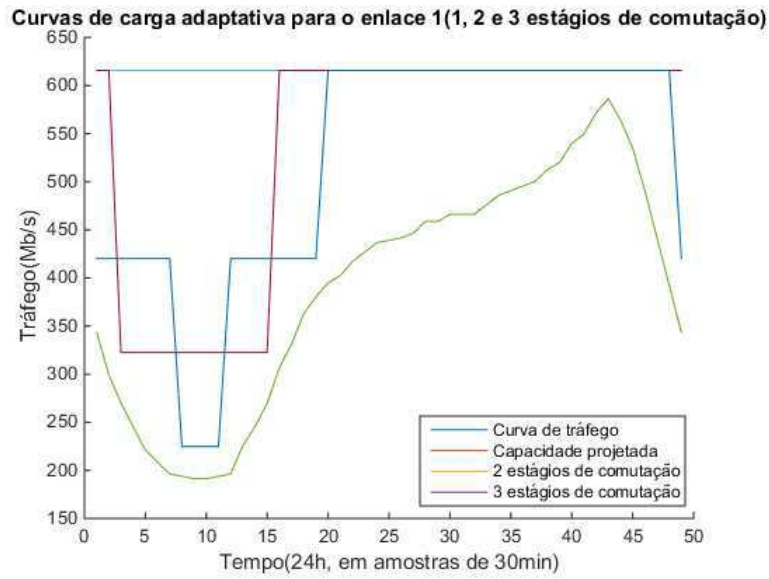


Figura 13: Curvas do modelo de consumo adaptado à carga para o enlace 1 para 1, 2 e 3 estágios de comutação.

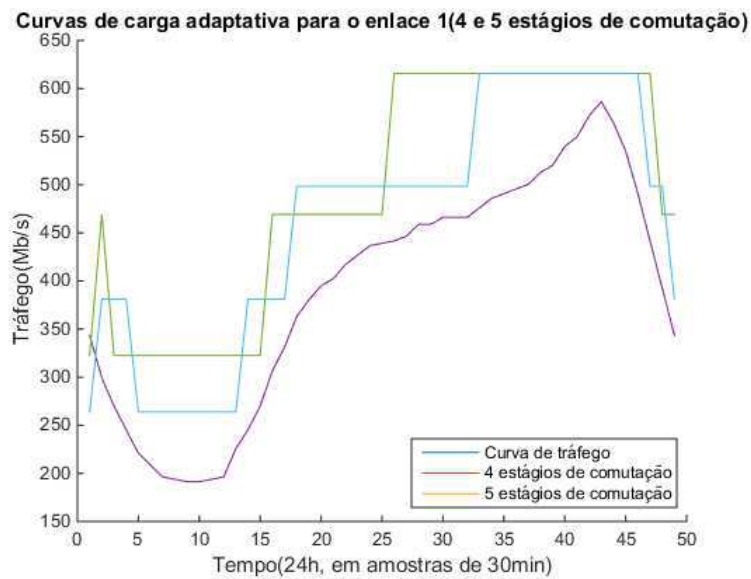


Figura 14: Curvas do modelo de consumo adaptado à carga para o enlace 1 para 4 e 5 estágios de comutação.

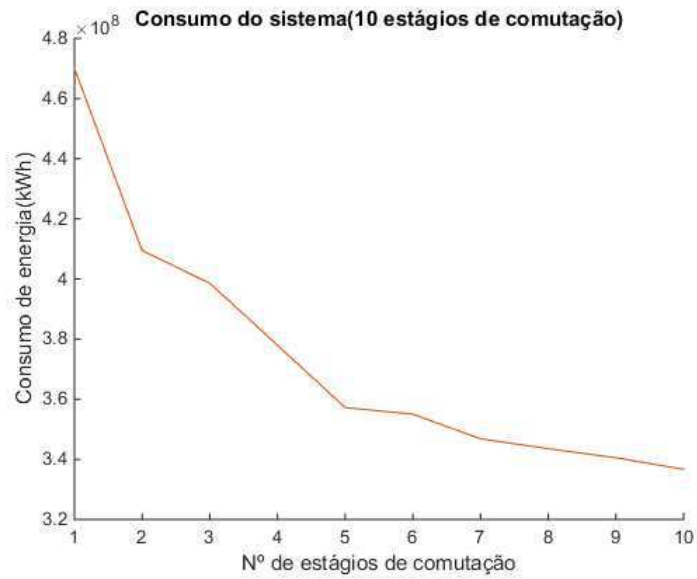


Figura 15: Consumo do enlace 1 em kWh em função do nº de estágios de comutação do modelo de consumo adaptado à carga (10 estágios).

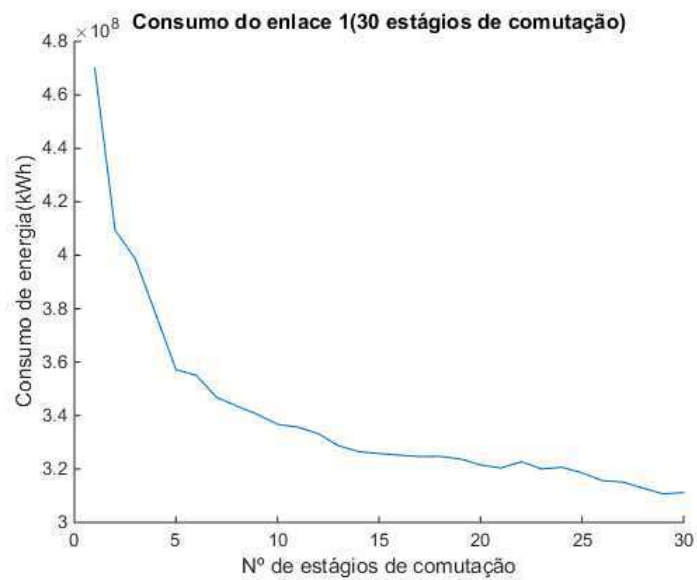


Figura 16: Consumo do enlace 1 em kWh em função do nº de estágios de comutação do modelo de consumo adaptado à carga (30 estágios).

## 5 Conclusão

É possível verificar que há uma crescente preocupação com o consumo de energia para os sistemas de telecomunicação, tanto do ponto de vista da efficientização do sistema em nome de reduzir custos como da crescente preocupação com o impacto ambiental da rede. Ainda, verifica-se que recentemente esse consumo vem atingindo níveis consideráveis, e isso não era o caso no passado, o que constitui mais um motivo para estudar maneiras de aumentar a eficiência do sistema.

Assim, foram vistas algumas das soluções propostas para essa desafio. Dentro do escopo de telecomunicações, a implementação de sistemas e arquiteturas mais eficientes possuem grande potencial, mas necessitam de trabalhos futuros por exigirem uma pesquisa extensiva para determinar sua viabilidade. Ainda, o modelo de consumo energético adaptado ao nível do tráfego de dados surge como uma alternativa prática, que trabalha dentro dos parâmetros da rede já instalada.

Os resultados obtidos a partir da simulação do modelo de consumo adaptado à carga mostram que há ganhos consideráveis que podem ser obtidos ao se implementar essa solução na rede. Entretanto, é necessário lembrar que não foram considerados alguns fatores, como perdas causadas pela comutação entre estágios e queda na qualidade de serviço.

## 6 Referências

### Referências

- [1] G. Shen e R. Tucker, “Energy-Minimized Design for IP Over WDM Networks”, *Journal of Optical Communications Networks*, vol. 1, no. 1, 2009.
- [2] C. Lange, D. Kosiankowski, A. Betker, H. Simon, N. Bayer, D. Hugo, H. Lehmann e A. Gladisch, “Energy Efficiency of Load-Adaptively Operated Telecommunication Networks”, *Journal of Lightwave Technology*, vol. 32, no. 4, 2014.
- [3] K. Lee, B. Sedighi, R. Tucker, H. Chow e P. Vetter “Energy Efficiency of Optical Transceivers in Fiber Access Networks”, *Journal of Optical Communications Networks*, vol. 4, no. 9, 2012.
- [4] A. Ellis, N. Mac Suibhne, D. Saad e D. Payne, “Communication networks beyond the capacity crunch”, *Philosophical Transactions A*, 2015.
- [5] Cisco, “Cisco Visual Networking Index: Forecast and Methodology, 2014–2019”, 2017.
- [6] M. Caria, M. Chamania e A. Jukan, “A Comparative Performance Study of Load Adaptive Energy Saving Schemes for IP-Over-WDM Networks”, *Journal of Optical Communications Networks*, vol. 4, no. 3, 2012.
- [7] Yi Zhang, P. Chowdhury, M. Tornatore e B. Mukherjee, “Energy Efficiency in Telecom Optical Networks”, *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 12, no. 4, 2010.
- [8] J. Farias, “Crescimento do tráfego IP e consumo de energia em redes ópticas de transporte”, *Simpósio Brasileiro de Telecomunicações*, 2012.
- [9] L. Biazotto, “Consumo de energia e qualidade do serviço em redes IEEE802.11”, *Pontifícia Universidade Católica - Campinas*, 2012.
- [10] K. Gross e K. Vaidyanathan, “MegaWatt-Hours Avoided”, 2015.
- [11] M. Arnemann, “Energy Efficiency of Refrigeration Systems”, *Purdue E-pubs*, 2012.
- [12] “<http://www.datacenterknowledge.com/geothermal-data-centers/>”, acessado em 15/04/2016.
- [13] L. Kull, “Challenges in implementing high-speed, low-power ADCs in CMOS”, *OFC Th1B.2*, 2015.

- [14] G. Schütz e N. Correia, “Design of QoS-Aware Energy-Efficient Fiber–Wireless Access Networks”, *Journal of Optical Communications Networks*, vol. 4, no. 8, 2012.
- [15] G. Koutitas e P. Demestichas, “A Review of Energy Efficiency in Telecommunication Networks”, *Telfor Journal*, vol. 2, no. 1, 2010.
- [16] “<https://s3-us-west-2.amazonaws.com/belllabs-microsite-greentouch/index.html>”, acessado em 18/05/2016.