

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



Universidade Federal
de Campina Grande

RELATÓRIO DE ESTÁGIO

*Simulação de uma rede de enlaces IP/WDM com
consumo de energia adaptado à carga*

Augusto de Holanda Barreto Martins Tavares

Campina Grande - PB
Maio de 2016

AUGUSTO DE HOLANDA BARRETO MARTINS TAVARES

*Simulação de uma rede de enlaces IP/WDM com
consumo de energia adaptado à carga*

Relatório de Estágio Supervisionado 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

Prof. Dr. Rômulo Maranhão do Valle
Supervisor

Campina Grande - PB
Maio de 2016

AUGUSTO DE HOLANDA BARRETO MARTINS TAVARES

*Simulação de uma rede de enlaces IP/WDM com
consumo de energia adaptado à carga*

Relatório de Estágio Supervisionado 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

Agradecimentos

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

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

Ao meu amor.

Sumário

Resumo	iii
Abstract	iv
Lista de Figuras	v
Lista de Tabelas	vii
Lista de Siglas e Abreviaturas	viii
1 Introdução	1
1.1 O Laboratório de Comunicações (LABCOM)	1
1.2 Objetivos	1
1.3 Metodologia	1
1.4 Cronograma	2
2 Revisão bibliográfica	3
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
2.3 Funcionamento por meio de consumo adaptado ao nível do tráfego de dados	9
2.4 Redes IP/WDM	12
3 Desenvolvimento do modelo da rede	14
3.1 O modelo nodal da rede	14
3.1.1 Tráfego de pico para cada conexão de cada nó da rede	15
3.1.2 Número de usuários por nó	15

3.1.3	Distâncias correspondentes a cada enlace da rede	17
3.1.4	Modelo dos enlaces da rede	18
3.2	Curvas de tráfego para os enlaces da rede	19
4	Transposição do modelo da rede para código em MATLAB	22
4.1	Entrada e tratamento de dados	22
4.2	Aplicação do modelo de consumo de energia adaptado ao tráfego de dados	22
4.3	Cálculo do consumo da rede	23
4.4	Implementação de uma interface gráfica	23
5	Resultados	25
5.1	Curvas do consumo adaptado à carga	25
5.2	Consumo de energia da rede em função do número de estágios de comutação	28
6	Conclusão	30
7	Referências	31
	Anexo I - Código para a Simulação de uma rede de enlaces IP/WDM com consumo de energia adaptado à carga	33
	Anexo II - Função para o cálculo das curvas do modelo de consumo adaptado à carga	36

Resumo

Com o aumento exponencial da infraestrutura de telecomunicações na última década, soluções que procurem melhorar sua eficiência no consumo de energia elétrica vêm sendo propostas. Este relatório de estágio aborda o processo de desenvolvimento de um modelo da rede e o impacto da aplicação de uma dessas soluções, o consumo de energia elétrica adaptado ao nível do tráfego de dados, sobre a sua eficiência.

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

Abstract

With the exponential growth of the telecommunications infrastructure in the last decade, solutions that look to improve their efficiency in electrical energy consumption have been proposed. This internship report explores the process of developing a model for the network and the impact of one of those solutions, the load-adaptive model, over its efficiency.

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.	10
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.	10
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.	12
8	Modelo de um enlace IP/WDM.	13
9	Modelo nodal da rede nodal utilizada na simulação, baseada na antiga NSFnet.	14
10	Tráfego diário no ponto de interconexão da internet London-IX para o dia 05 de Maio de 2016.	19
11	Curva normalizada do tráfego no ponto de interconexão da internet em Londres.	20
12	Curva normalizada do tráfego no ponto de interconexão da internet em Amsterdam.	21
13	Curva de tráfego agregado diário para os pontos de interconexão da rede no Brasil.	21
14	Interface gráfica desenvolvida para o código de simulação do modelo do consumo adaptado à carga.	24
15	Curvas do modelo de consumo adaptado à carga para o enlace 1 para 1, 2 e 3 estágios de comutação. (Curva LND-IX)	26
16	Curvas do modelo de consumo adaptado à carga para o enlace 1 para 4 e 5 estágios de comutação. (Curva LND-IX)	26
17	Curvas do modelo de consumo adaptado à carga para o enlace 1 para 1, 2 e 3 estágios de comutação. (Curva AMS-IX)	27
18	Curvas do modelo de consumo adaptado à carga para o enlace 1 para 4 e 5 estágios de comutação. (Curva AMS-IX)	27

19	Consumo do enlace 1 em kWh em função do nº de estágios de comutação do modelo de consumo adaptado à carga (30 estágios - Curva LND-IX).	29
20	Consumo do enlace 1 em kWh em função do nº de estágios de comutação do modelo de consumo adaptado à carga (30 estágios - Curva AMS-IX).	29

Lista de Tabelas

I	Cronograma proposto	2
II	Tabela contendo o tráfego de pico para cada enlace entre os nós da rede mostrada na Figura 9, em Megabits/s. Parte 1	16
III	Tabela contendo o tráfego de pico para cada enlace entre os nós da rede mostrada na Figura 9, em Megabits/s. Parte 2	16
IV	Número de usuários por nó da rede mostrada na Figura 9, em milhões de usuários.	17
V	Número de usuários por enlace da rede considerando uma distribuição uniforme entre os enlaces de cada nó, em milhões de usuários.	17
VI	Distâncias dos enlaces entre os nós da rede mostrada na Figura 9, em km.	17
VII	Elementos utilizados na rede e sua potência nominal	18
VIII	Tráfego no ponto de interconexão da rede localizado em Londres, em Tbps. Dados obtidos a partir da Figura 10.	20
IX	Tráfego no ponto de interconexão da rede localizado em Amsterdam, em Tbps. Dados obtidos a partir da Figura 5.	20
X	Consumo de energia elétrica da rede em função do número de estágios de comutação (Curva LND-IX).	28
XI	Consumo de energia elétrica da rede em função do número de estágios de comutação (Curva AMS-IX).	28

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

Com a crescente expansão da rede de telecomunicações, fruto da necessidade de atender às demandas cada vez maiores do número de usuários, que por sua vez também cresce a uma taxa alarmante, o custo dessas redes do ponto de vista de seu consumo energético passou a ser um fator importante dentro de seu projeto e implementação. Assim, há uma procura constante por soluções que possam tornar o sistema cada vez mais eficiente, reduzindo os seus custos de operação de maneira a aumentar os lucros e diminuir o impacto ambiental causado.

Este relatório descreve o desenvolvimento de um modelo para a rede, posteriormente transposto para código implementado no MATLAB, com o objetivo de simular o impacto de uma dessas soluções na rede, o consumo de energia elétrica adaptado ao nível de tráfego de dados, de maneira a obter projeções para os possíveis ganhos em eficiência energética para enlaces IP/WDM.

1.1 O Laboratório de Comunicações (LABCOM)

O estágio descrito neste relatório foi desenvolvido no Laboratório de Comunicações (LABCOM) do Departamento de Engenharia Elétrica (DEE) da Universidade Federal de Campina Grande.

1.2 Objetivos

- Compreensão da topologia das redes de telecomunicações modernas, assim como de seu consumo de energia elétrica;
- Desenvolvimento de um modelo para uma rede de telecomunicações formada por enlaces IP/WDM;
- Transposição do modelo desenvolvido para código utilizando o MATLAB;
- Análise dos resultados da simulação do modelo desenvolvido.

1.3 Metodologia

As atividades desenvolvidas ao longo da realização deste 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, o seu consumo. Ainda, será estudada a fundamentação teórica por trás do modelo de consumo de energia elétrica adaptado ao tráfego de dados e a tecnologia por trás de um enlace IP/WDM;

2. Utilização da pesquisa realizada no item anterior para desenvolver um modelo para uma rede de telecomunicações moderna;
3. Coleta de dados sobre tráfego em redes, número de usuários e consumo do sistema;
4. Simulação do modelo desenvolvido utilizando os dados coletados.

1.4 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

Revisão bibliográfica	06/04/2016 a 15/04/2016
Desenvolvimento do modelo da rede	16/04/2016 a 01/05/2016
Coleta de dados	02/05/2016 a 10/05/2016
Simulação do modelo desenvolvido	11/05/2016 a 31/05/2016

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.

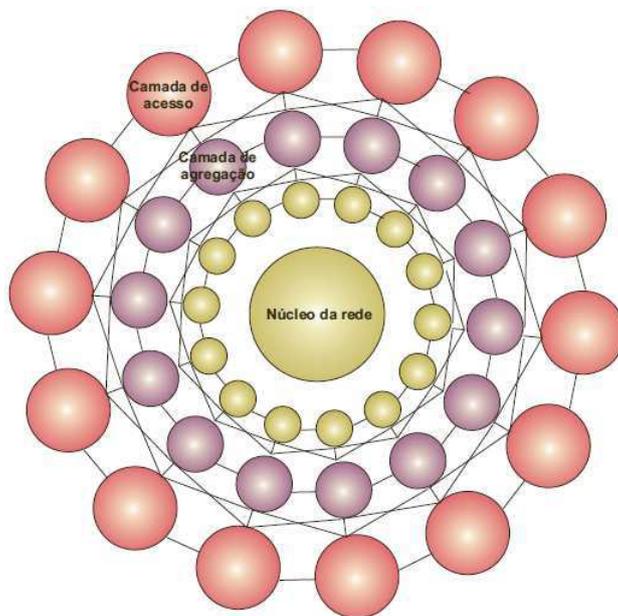


Figura 1: Camadas da rede de telecomunicações.

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

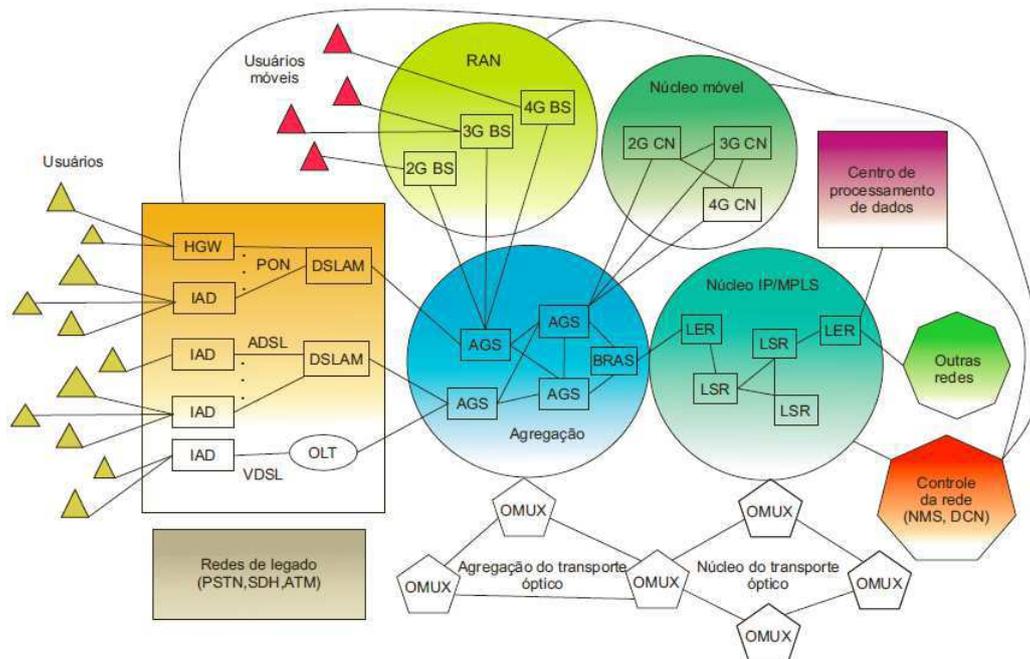


Figura 2: Interligação dos diversos componentes que formam a rede de telecomunicações, para as redes móvel e fixa.

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.

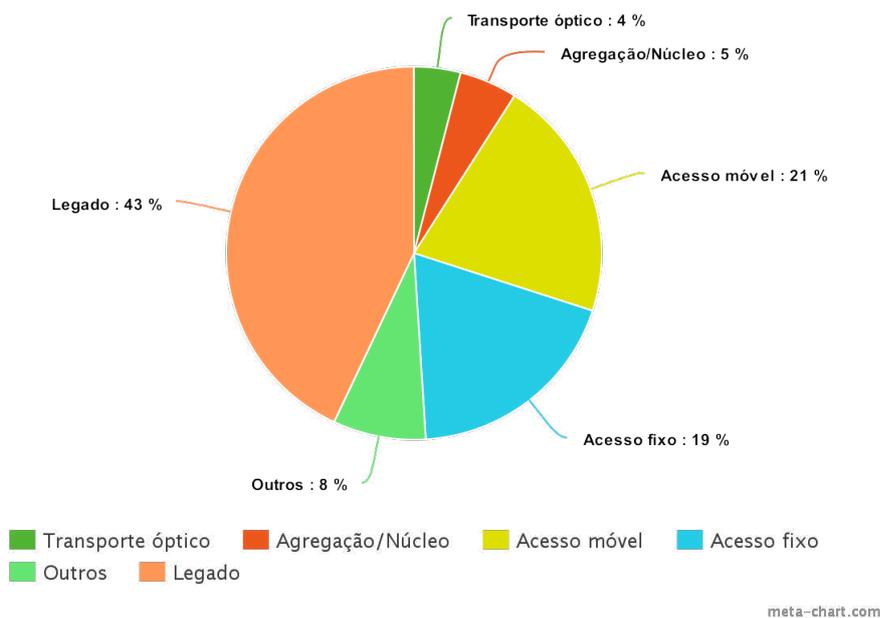


Figura 3: Divisão percentual do consumo de cada parte da rede de telecomunicações. *Fonte: [2].*

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

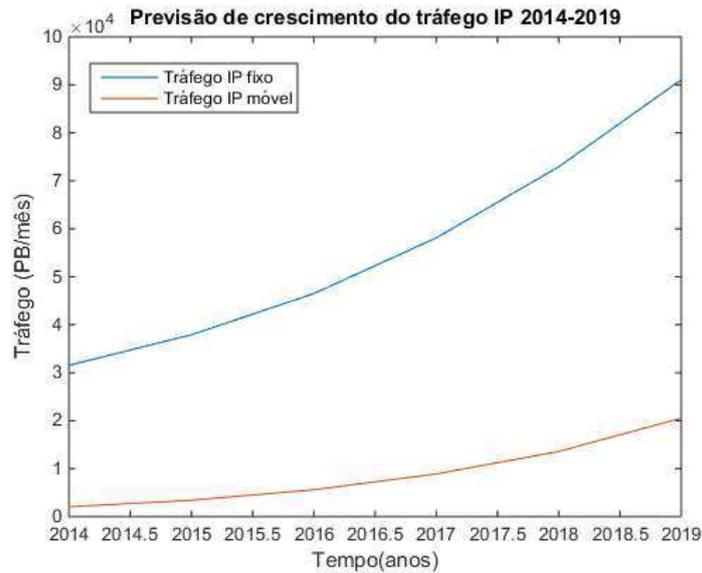


Figura 4: Previsão de crescimento para o tráfego IP de 2014 a 2019. *Dados: [5].*

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.

2.3 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.

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.

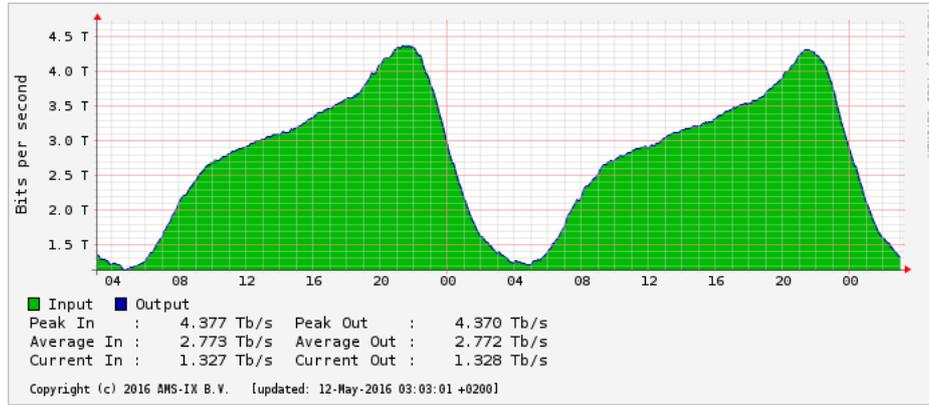


Figura 5: Tráfego diário no ponto de interconexão da rede AMS-IX para o dia 12 de Maio de 2016.

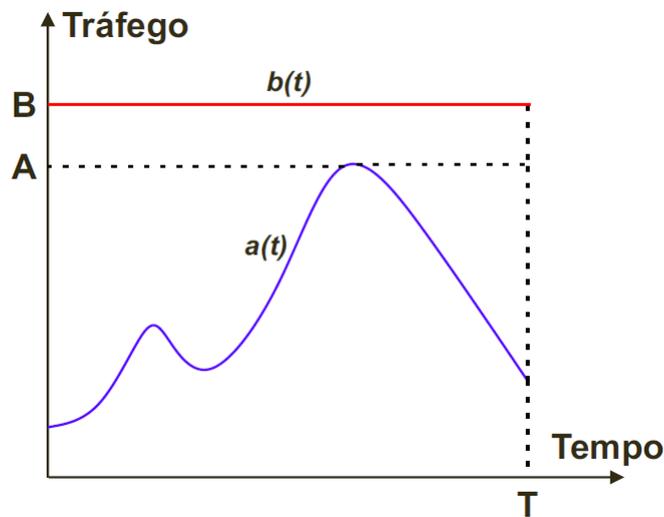


Figura 6: Gráfico da tráfego ao longo do tempo e da capacidade oferecida por um sistema utilizado para exemplificar o modelo de consumo adaptado à carga.

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.

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

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:

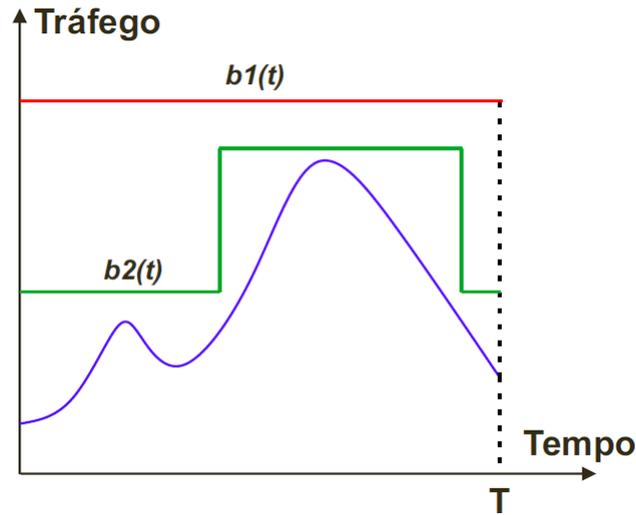


Figura 7: Gráfico comparando a capacidade oferecida pelo método de projeto tradicional e por um modelo de consumo adaptado à carga com 2 estágio de comutação.

- 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;

2.4 Redes IP/WDM

Os enlaces de uma rede baseada em uma estrutura IP/WDM são formados por duas camadas, a camada IP e a camada óptica, como pode ser visto na Figura 8. Na camada IP, um roteador de núcleo (*Core Router*) está conectado a um comutador óptico por meio de uma interface de curto alcance, e agrega o tráfego de dados dos roteadores *low-end* localizados na camada de acesso.

A camada óptica permite a comunicação entre diferentes roteadores IP. Os nós onde os roteadores de núcleo se conectam à camada óptica são interligados por meio de enlaces de fibra óptica, que podem possuir múltiplas fibras. Para cada fibra, há um um par de multiplexadores e demultiplexadores de comprimento de onda, utilizados para a aplicação de WDM no sinal. O elemento de comutação óptica pode ser um *Optical Cross Connect* (OXC) com controle automático ou um canal óptico comum.

Associado a cada comprimento de onda utilizado há um par de *transponders* para a transmissão de dados. Para viabilizar a transmissão a longas distâncias são

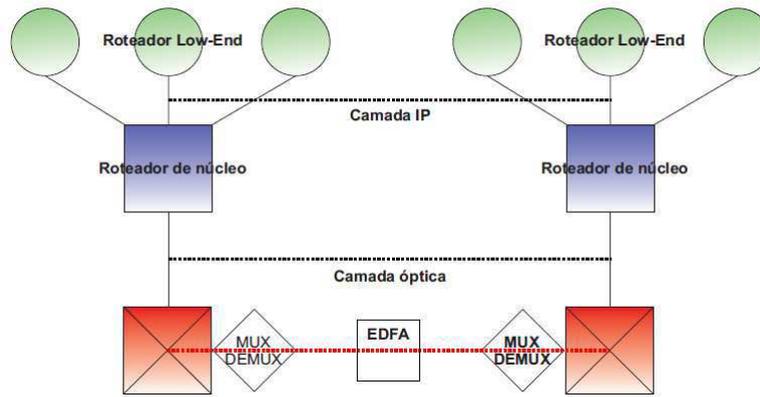


Figura 8: Modelo de um enlace IP/WDM.

empregados amplificadores EDFA.

Há duas maneiras de implementar redes IP/WDM:

- *Non-bypass*: Todos os feixes de luz incidentes em um nó devem ser interrompidos ali, e caso a informação contida neles seja destinada a outro ponto da rede, ela deve ser processada e enviada através de um roteador IP.
- *Bypass*: O tráfego IP contido nos feixes de luz incidentes em um nó o atravessa por um atalho. Essa alternativa exige a capacidade de diferenciar entre o tráfego destinado àquele ponto e o que deve seguir em frente para outros pontos da rede.

Os roteadores IP representam o ponto de maior consumo em redes IP/WDM, uma vez que o enlace óptico consome relativamente pouca energia[1]. Assim, a redução do número de roteadores ou do seu consumo pode impactar enormemente o consumo de redes IP/WDM. A técnica de *Bypass* é um avanço nesse sentido, uma vez que ela elimina a necessidade de processamento de dados não destinados a um nó pelo roteador local.

3 Desenvolvimento do modelo da rede

3.1 O modelo nodal da rede

Dentro do escopo do estágio, decidiu-se que a maneira mais efetiva de obter-se resultados relevantes seria a simulação do método de consumo adaptado à carga para os enlaces de uma rede.

Assim, um dos primeiros pontos a ser definido foi o modelo da rede a ser utilizado. Após diversas interações, chegou-se a conclusão de que era possível implementar a simulação de uma rede com um número razoável de nós. Foi considerada a possibilidade de utilizar um modelo baseado no Brasil, mas a dificuldade em encontrar dados além de curvas de tráfego levou à escolha da antiga NSFnet como base. A NSFnet foi uma rede dedicada à pesquisa localizada, nos Estados Unidos da América. O modelo nodal da rede utilizado pode ser visto na Figura 9.

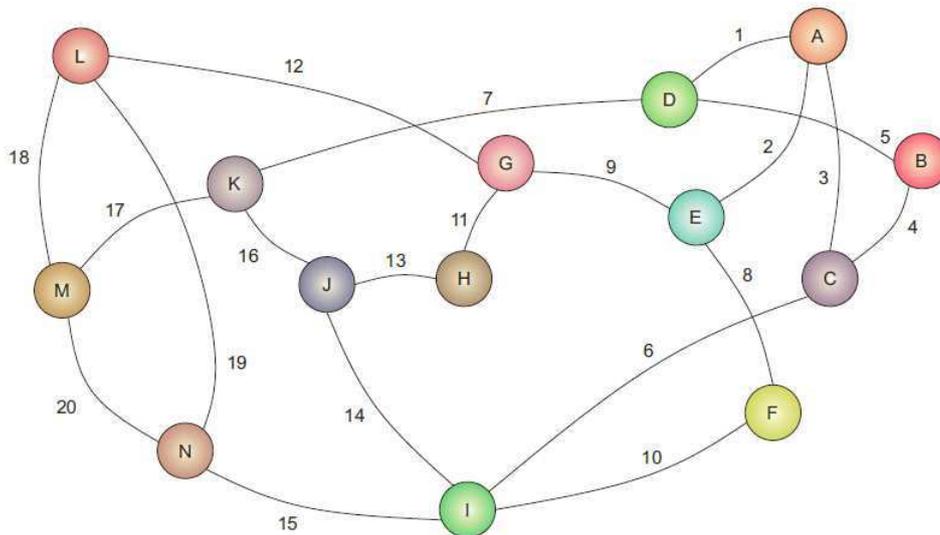


Figura 9: Modelo nodal da rede nodal utilizada na simulação, baseada na antiga NSFnet.

As posições dos nós do modelo possuem correspondência com a posição geográfica dos estados americanos onde os pontos da NSFnet estavam localizados.

Definido o modelo nodal, teve início o processo de coleta de dados. Era relevante ter conhecimento dos seguintes fatores para a simulação:

- Tráfego de pico para cada conexão de cada nó da rede;
- Conexões entre cada nó;
- Número de usuários por nó da rede;
- Distâncias correspondentes a cada enlace da rede.

3.1.1 Tráfego de pico para cada conexão de cada nó da rede

Uma vez que o método de consumo adaptado à carga depende fundamentalmente do conhecimento do tráfego de dados na rede, é necessário um conjunto de dados que permita a estimativa da curva de tráfego para cada enlace. Assim, é necessário que se conheça o tráfego de pico para cada um dos enlaces da rede. Foram utilizados valores da antiga NSFnet, atualizados para os níveis de tráfego atual[6], e os valores adotados podem ser vistos nas Tabelas II e III.

As duas tabelas formam uma matriz, que assume a função de representação matemática das conexões entre cada nó. Elementos nulos indicam que não há conexão entre os nós do par linha-coluna correspondente ao elemento, enquanto os elementos não nulos indicam que há uma ligação direta entre os dois. A construção dessa matriz é fruto de dois pressupostos que foram adotados para simplificar o processo de simulação da rede.

O primeiro é que cada nó recebe tráfego apenas de suas conexões imediatas, considerando-se que o fluxo advindo dessas conexões já abarca o tráfego das conexões não imediatas. Essa consideração permite uma simplificação no método de tratamento dos dados inseridos na simulação, e não gera grandes perdas de precisão dos resultados, uma vez que a maior parte do consumo está localizado na camada de acesso e a diferença no custo energético por bit ao se desconsiderar a distância dos enlaces não imediatos não é significativa.

A segunda consideração é que o tráfego foi considerado simétrico para os dois sentidos, ou seja, o valor de pico indica a soma do fluxo de dados no enlace em ambas as direções. Isso permitiu que apenas uma curva de tráfego pudesse ser utilizada para ambos os enlaces, e foi uma medida adotada por uma questão de tempo, uma vez que a quantidade de dados a ser recolhida para obter duas curvas de tráfego por enlace da rede não permitiria a implementação das demais partes da simulação.

3.1.2 Número de usuários por nó

Como já foi dito, há uma correspondência entre a posição dos nós e estados dos Estados Unidos da América. Assim, o número de usuários por nó foi obtido a partir do número de habitantes de cada um desses estados. Os valores utilizados podem ser encontrados na Tabela IV.

Há uma consideração a ser feita sobre a distribuição dos usuários dentro da rede. Uma vez que cada nó possui pelo menos dois enlaces, é preciso definir a parcela de usuários que está, em um dado momento, utilizando cada um deles. Entretanto, esse tipo de informação é de difícil obtenção, e, por simplicidade e para evitar suposições baseadas em critérios não objetivos, definiu-se que os usuários seriam

Tabela II: 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 III: 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

uniformemente distribuídos entre os enlaces de cada nó.

Assim, por exemplo, há 4 milhões de usuários utilizando cada um dos enlaces do nó E da rede. Portanto, o número total de usuários por enlace é definido pela soma entre essa divisão uniforme para cada nó envolvido. O número de usuários por

Tabela IV: 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	8,00	8,90	0,67	9,00	12,00	10,00	13,00
Nó	H	I	J	K	L	M	N
Nº de usuários	2,90	27,00	5,00	3,00	7,00	20,00	20,00

enlace pode ser encontrado na Tabela V, e é possível ver que os valores resultantes estão em uma ordem de grandeza adequada para a dimensão da rede simulada.

Tabela V: Número de usuários por enlace da rede considerando uma distribuição uniforme entre os enlaces de cada nó, em milhões de usuários.

Enlace	1	2	3	4	5
Nº de usuários	2,89	5,67	6,67	3,19	5,96
Enlace	6	7	8	9	10
Nº de usuários	9,22	4,00	7,33	8,33	12,33
Enlace	11	12	13	14	15
Nº de usuários	5,33	6,67	2,63	10,67	15,67
Enlace	16	17	18	19	20
Nº de usuários	2,67	7,67	9,00	9,00	13,33

3.1.3 Distâncias correspondentes a cada enlace da rede

As distâncias utilizadas na simulação foram obtidas a partir da distância geográfica entre os estados onde ficavam localizados os diversos nós da rede. Uma vantagem do modelo escolhido é a variedade de distâncias envolvidas, indo desde enlaces relativamente curtos, com apenas algumas centenas de quilômetros, até enlaces de longo alcance, com milhares de quilômetros.

Tabela VI: 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

3.1.4 Modelo dos enlaces da rede

Uma vez definidos a topologia, o número de usuários e as distâncias dos enlaces, é necessário modelar o enlace em si. A escolha de um modelo enlace apresentou um desafio notável no decorrer do estágio, por causa da necessidade de analisar a rede do ponto de vista do consumo energético.

Essa abordagem exige um conhecimento íntimo dos elementos que compõem a rede. Isso se mostra um problema, pois a maioria dos modelos para enlace possui características muito heterogêneas, admitindo diversas configurações de *hardware* para o desempenho de suas funções. Como a determinação de parâmetros sobre o consumo de energia dos dispositivos envolvidos era de fundamental importância, incluindo a necessidade de consultar *datasheets* de equipamentos empregados atualmente na rede, essa diversidade tornou difícil a determinação de um conjunto de componentes que pudesse representar de maneira fiel o consumo efetivo do enlace.

Assim, foi escolhido o modelo de um enlace IP/WDM, cujas características foram estudadas na revisão bibliográfica deste mesmo trabalho. Esse modelo destacou-se pela simplicidade, ampla utilização em redes modernas e facilidade de determinação dos equipamentos que compõem o enlace típico.

Definido o modelo para os enlaces, restou apenas estipular um perfil do usuário da rede. Aqui, mais uma vez, a obtenção de dados tornou-se um problema, uma vez que o perfil de consumo dos consumidores da rede geralmente é uma informação obtida por meio de pesquisa de mercado por empresas provedoras de serviço, e não é de fácil acesso.

Foi decidido que dada a natureza do enlace IP/WDM, que se aplica a redes modernas, os consumidores seriam do tipo *triple play*, fazendo uso de 2 *notebooks* e dois *smartphones*, em conjunto com um roteador para acessar a rede. Ainda, há a necessidade de definir o consumo energético das camadas de agregação, equivalente ao roteador de núcleo, e da camada de núcleo da rede, que é a rede de transporte óptico baseada em WDM. Foram considerados 2 roteadores de núcleos por nó da rede, baseado na arquitetura do ponto de interconexão da internet localizado em Amsterdam. Os dados sobre o consumo da fibra foram obtidos em [8]. A Tabela VII contém os dados utilizados nas simulações.

Tabela VII: 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	$8 \times 1\text{W/km}$
<i>Notebook</i>	Dell Latitude E6239	65W
Carregador de celular	Power Integrations 3.6W TNY266P	3,6W

3.2 Curvas de tráfego para os enlaces da rede

Como o modelo de consumo adaptado à carga atua alterando a capacidade oferecida pelo sistema de acordo com a curva de tráfego para o enlace analisado, para que resultados confiáveis sejam produzidos é crucial que a curva utilizada represente de maneira razoável as variações que podem ocorrer em uma rede real.

Tendo esse objetivo em mente, optou-se pela utilização de duas curvas de tráfego para a simulação da rede, baseadas no fluxo de dados diário nos pontos de interconexão da rede baseados em Londres e Amsterdam. As curvas utilizadas, obtidas a partir dos valores disponibilizados nos *sites* das organizações responsáveis pela administração dessas redes podem ser vistas nas Figuras 5 e 10.

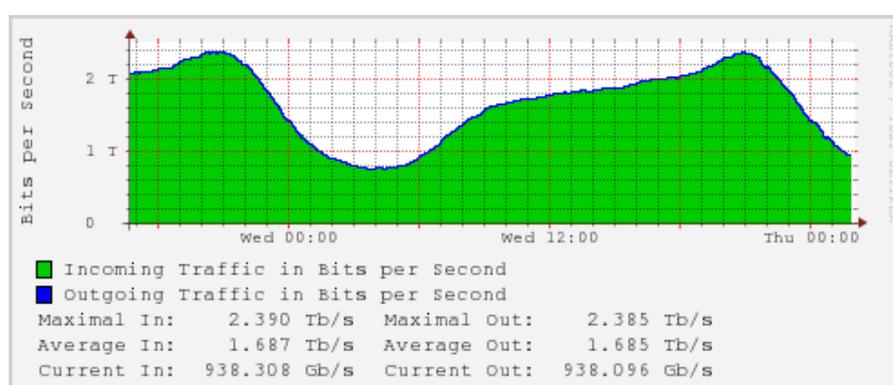


Figura 10: Tráfego diário no ponto de interconexão da internet London-IX para o dia 05 de Maio de 2016.

A transposição das curvas apresentadas nessas figuras para o MATLAB foi feita tomando-se amostras a cada 30 minutos, totalizando 48 pontos para a análise, número que se mostrou satisfatório para a precisão desejada. Os resultados dessa amostragem podem ser encontrados nas Tabelas VIII e IX. Para que as curvas obtidas a partir desses dados pudessem ser aplicadas para o tráfego de todos os enlaces da rede, utilizando os dados contidos nas Tabelas II e III, elas precisaram ser normalizadas. Esse processo foi realizado já dentro do código da simulação, e os gráficos resultantes podem ser vistos nas Figuras 11 e 12.

Os dados para o sistema Brasileiro de pontos de interconexão da rede foram encontrados posteriormente ao início das simulações e podem ser vistos na Figura 13.

Tabela VIII: Tráfego no ponto de interconexão da rede localizado em Londres, em Tbps. Dados obtidos a partir da Figura 10.

Horário	00:00	00:30	01:00	01:30	02:00	02:30	03:00	03:30	04:30	05:00	05:30	06:00
Tráfego	1,40	1,22	1,10	1,00	0,90	0,85	0,80	0,79	0,78	0,78	0,79	0,80
Horário	06:30	07:00	07:30	08:00	08:30	09:00	09:30	10:00	10:30	11:00	11:30	12:00
Tráfego	0,92	1,00	1,10	1,25	1,35	1,48	1,55	1,61	1,64	1,70	1,74	1,78
Horário	12:30	13:00	13:30	14:00	14:30	15:00	15:30	16:00	16:30	17:00	17:30	18:00
Tráfego	1,79	1,80	1,82	1,87	1,87	1,90	1,90	1,90	1,94	1,98	2,00	2,02
Horário	18:30	19:00	19:30	20:00	20:30	21:00	21:30	22:00	22:30	23:00	23:00	00:00
Tráfego	2,04	2,09	2,12	2,20	2,24	2,33	2,39	2,30	2,18	2,00	1,80	1,60

Tabela IX: Tráfego no ponto de interconexão da rede localizado em Amsterdam, em Tbps. Dados obtidos a partir da Figura 5.

Horário	00:00	00:30	01:00	01:30	02:00	02:30	03:00	03:30	04:30	05:00	05:30	06:00
Tráfego	3,00	2,59	2,15	1,85	1,61	1,50	1,39	1,31	1,20	1,20	1,20	1,29
Horário	06:30	07:00	07:30	08:00	08:30	09:00	09:30	10:00	10:30	11:00	11:30	12:00
Tráfego	1,39	1,55	1,77	2,01	2,15	2,39	2,50	2,65	2,71	2,80	2,85	2,89
Horário	12:30	13:00	13:30	14:00	14:30	15:00	15:30	16:00	16:30	17:00	17:30	18:00
Tráfego	2,90	2,95	3,05	3,11	3,15	3,19	3,20	3,29	3,32	3,41	3,45	3,51
Horário	18:30	19:00	19:30	20:00	20:30	21:00	21:30	22:00	22:30	23:00	23:00	00:00
Tráfego	3,55	3,60	3,70	3,81	3,90	4,05	4,21	4,30	4,25	4,10	3,61	3,35

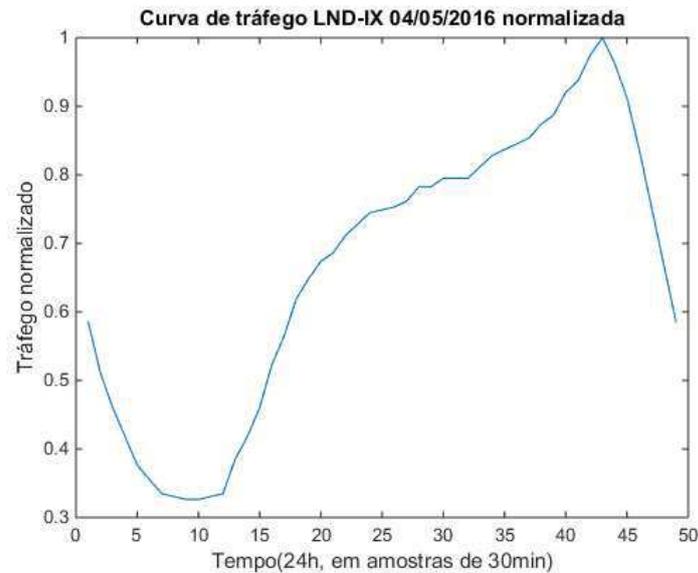


Figura 11: Curva normalizada do tráfego no ponto de interconexão da internet em Londres.

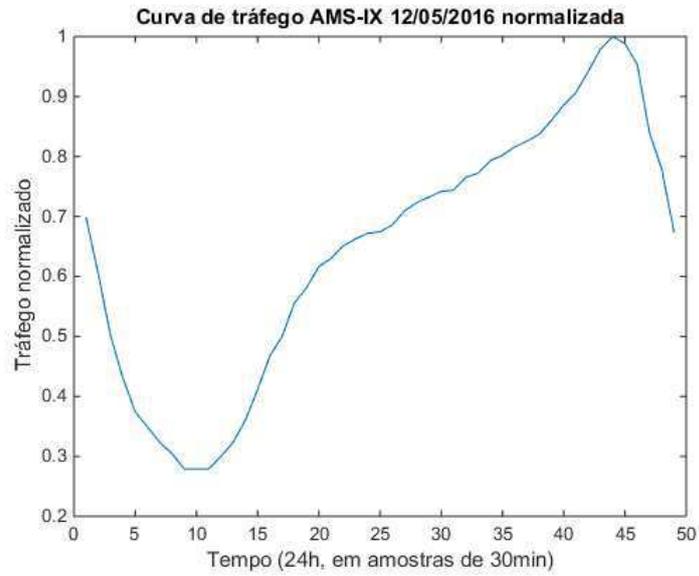


Figura 12: Curva normalizada do tráfego no ponto de interconexão da internet em Amsterdam.

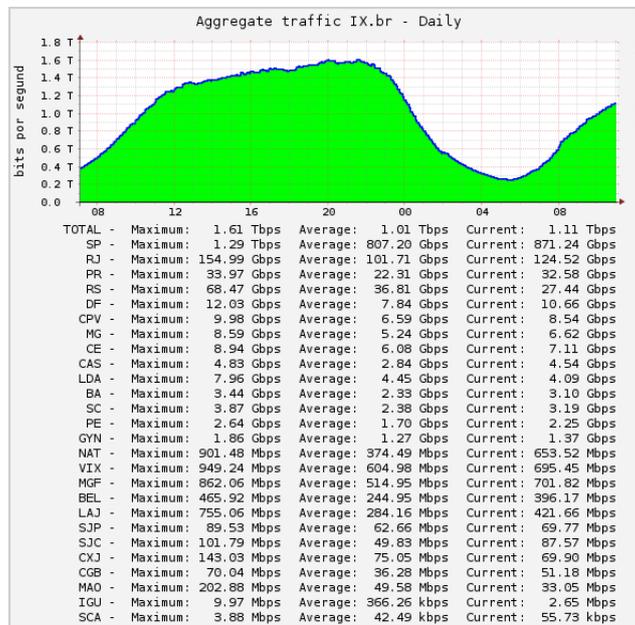


Figura 13: Curva de tráfego agregado diário para os pontos de interconexão da rede no Brasil.

4 Transposição do modelo da rede para código em MATLAB

Esta seção explica em detalhes as etapas da transposição do modelo da rede desenvolvido na seção anterior para código em MATLAB, demonstrando os desafios encontrados e as soluções empregadas para esses problemas.

4.1 Entrada e tratamento de dados

O primeiro passo para realizar a transição do modelo desenvolvido para código foi permitir a entrada dos dados coletados durante o desenvolvimento do modelo da rede. Para facilitar esse processo, assim como permitir uma maior flexibilidade na realização das simulações, foi definido que essa etapa seria realizada por meio de planilhas no formato *.xls*.

Em conjunto com essa decisão, foi definido também que o código a ser desenvolvido deveria, necessariamente, trabalhar da forma mais genérica possível, permitindo a entrada de redes com um número arbitrário de nós, enlaces e usuários, desde que fossem obedecidas as restrições listadas na seção anterior, assim como quaisquer valores para o consumo nominal dos dispositivos presentes.

A partir das planilhas são extraídos dados como o número de enlaces. Após a extração desses dados das planilhas, a cada enlace é atribuído um conjunto de valores correspondente ao seu número de usuários, tráfego, entre outras variáveis.

4.2 Aplicação do modelo de consumo de energia adaptado ao tráfego de dados

De posse da curva de tráfego adaptada ao nível do fluxo de dados de cada enlace, é possível, então, calcular as curvas para o método de consumo de energia adaptado ao tráfego de dados para toda a rede.

Mais uma vez, foi tomada a decisão que os métodos empregados deveriam possuir o maior grau de generalidade possível, permitindo a análise de qualquer perfil de tráfego e fornecendo as curvas de consumo adaptado à carga para um número arbitrário de estágios de comutação, definidos de acordo com os objetivos da simulação.

Houve um problema durante o desenvolvimento do código neste ponto. Verificou-se que havia a necessidade de um ajuste do período de validade dos níveis de capacidade oferecidos, que são essenciais para a aplicação do método, como foi visto

anteriormente. Como a natureza do MATLAB é trabalhar com dados discretos, o período de validade foi considerado apenas como o próximo elemento do vetor da curva analisada. Assim, há uma imprecisão nas curvas geradas para um número de estágios de comutação muito elevado, uma vez que a parte do código responsável por definir os níveis de capacidade atua mais rápido do que a curva em si varia.

Entretanto, os resultados obtidos são coerentes com o comportamento esperado do modelo teórico para simulações até 30 estágios de comutação. Uma vez que para a maioria dos trabalhos publicados são considerados até 10 estágios[2], pode-se afirmar que essa restrição não possui um grande impacto na validade do modelo desenvolvido.

4.3 Cálculo do consumo da rede

Por fim, a partir das curvas obtidas no item anterior, é possível calcular o consumo do sistema, assim como o custo energético por bit, em relação ao número de estágios de comutação, e verificar os ganhos possíveis com a implementação do modelo de consumo de energia adaptado ao tráfego de dados.

Esse é o segundo ponto onde a entrada de dados é relevante, mas dessa vez a escala dos dados a serem utilizados é menor, sendo feita individualmente para valores como o consumo de energia nominal dos equipamentos que integram a rede. É necessário notar que nesse ponto há restrições para a generalidade do código, uma vez que o cálculo preciso do consumo depende da ordem de grandeza dos valores utilizados.

Assim, é necessário obedecer a algumas restrições, como o fato de que o consumo do enlace de fibra óptica deve ser fornecido em W/1000km. Ainda há outras condições a serem obedecidas, como o período de análise estar limitado a 24 horas. Entretanto, foi tomado o cuidado para que a maioria das unidades utilizadas seja de uso comum, facilitando o trabalho de coletar os valores necessários.

4.4 Implementação de uma interface gráfica

Uma das conclusões obtidas ao longo do estágio foi que a maior parte da complexidade em simular um enlace IP/WDM com consumo de energia adaptado ao tráfego de dados está concentrada na coleta e entrada de dados na simulação. Assim, com o objetivo de facilitar o processo de obtenção de resultados e desenvolver uma ferramenta de uso simplificado, permitindo a alteração de valores constantes na simulação de maneira externa ao código, foi desenvolvida uma interface gráfica, que pode ser vista na Figura 14.

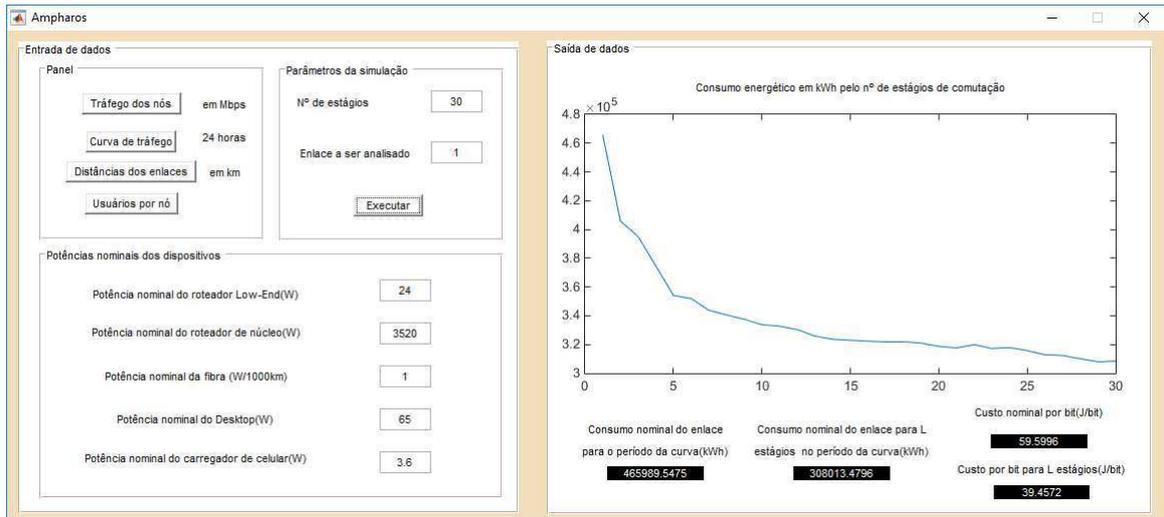


Figura 14: Interface gráfica desenvolvida para o código de simulação do modelo do consumo adaptado à carga.

Essa interface permite a entrada de todos os dados relevantes para a simulação, desde as planilhas *.xls* com os dados do modelo nodal da rede até os dados de consumo dos componentes de sistema. O número de estágios e o enlace cujos resultados serão exibidos na saída podem ser alterados livremente.

Na saída de dados pode ser visto o gráfico do consumo de energia do enlace em questão com relação ao número de estágios de comutação empregado, assim como uma série de outros valores referentes aos ganhos obtidos com o método de consumo adaptado à carga.

5 Resultados

Nesta seção serão mostrados os resultados obtidos da simulação da rede, utilizando os dados citados anteriormente. Por uma questão de praticidade, serão explorados os resultados completos de apenas um enlace da rede, utilizando as curvas de tráfego das Figuras 11 e 12.

5.1 Curvas do consumo adaptado à carga

As Figuras 15, 16, 17 e 18 mostram as curvas da capacidade oferecida para o método de consumo de energia adaptado ao tráfego de dados.

As Figuras 15 e 16 foram obtidas a partir da curva de tráfego da Figura 11, baseada no ponto de interconexão da rede em Londres, enquanto as Figuras 17 e 18 são baseadas na curva da Figura 12, do ponto de interconexão da rede baseado em Amsterdam.

Os gráficos obtidos mostram que o código desenvolvido tem a capacidade de produzir as curvas de capacidade, adaptando-se a diferentes curvas, para um número arbitrário de estágios. Entretanto, não há uma diferença muito grande entre os dois conjuntos, pois, embora as curvas de tráfego tenham sido obtidas em locais distintos, o perfil de consumo dos usuários não é tão diferente, com a curva de Amsterdam apresentando uma maior variação entre seu ponto de máximo e seu ponto de mínimo.

Ainda, é possível notar uma pequena descontinuidade nas curvas da capacidade oferecida nas Figuras 16 e 18. Isso se deve ao problema com o período de validade da capacidade oferecida pelo modelo de consumo adaptado à carga que foi citado anteriormente. Entretanto, essa anomalia não apresenta um impacto significativo nos resultados obtidos para o consumo da rede.

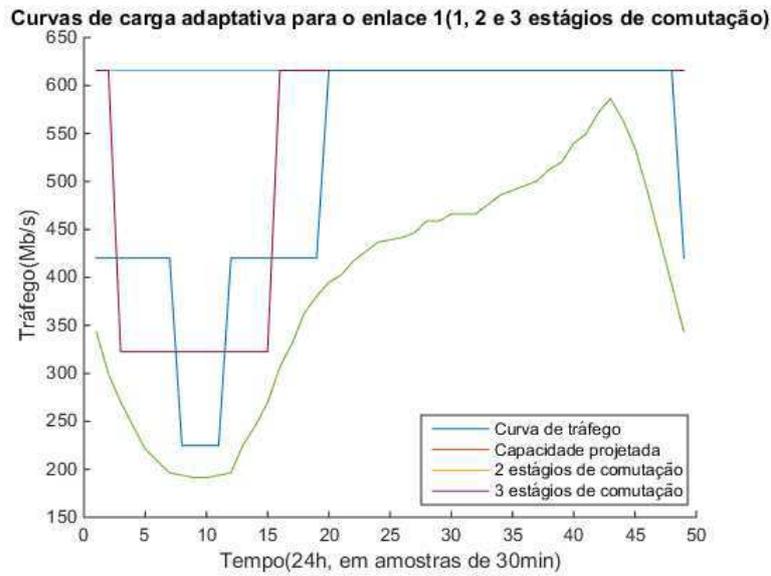


Figura 15: Curvas do modelo de consumo adaptado à carga para o enlace 1 para 1, 2 e 3 estágios de comutação. (Curva LND-IX)

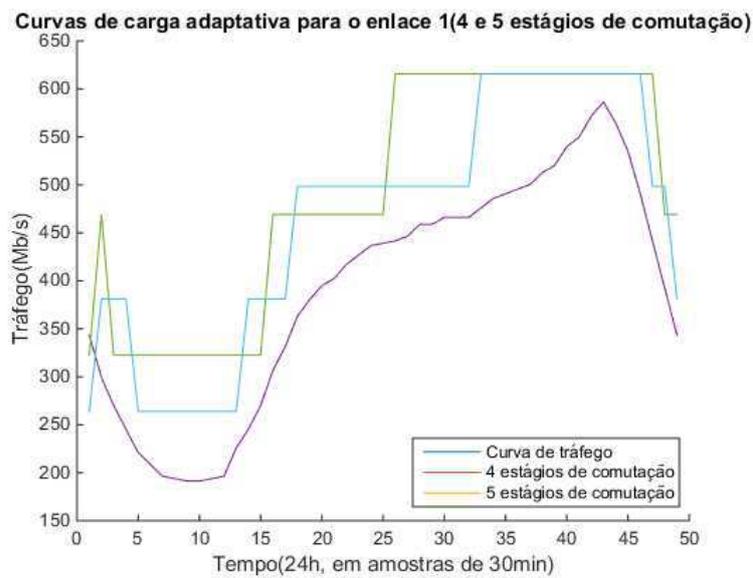


Figura 16: Curvas do modelo de consumo adaptado à carga para o enlace 1 para 4 e 5 estágios de comutação. (Curva LND-IX)

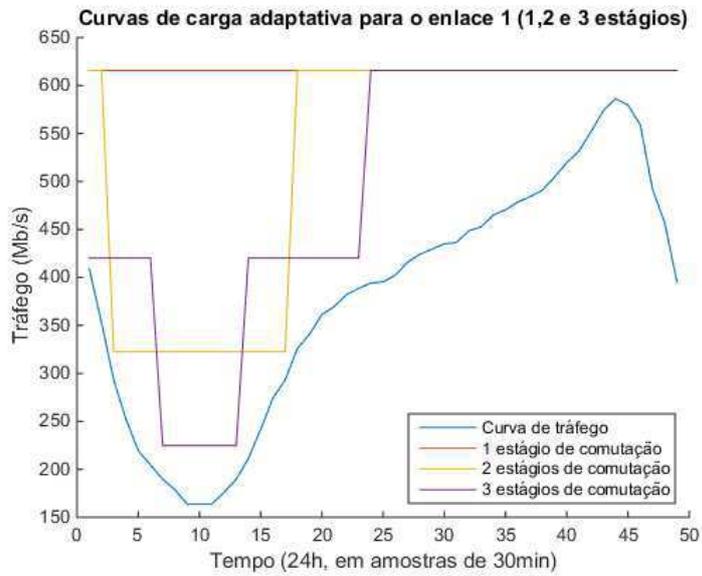


Figura 17: Curvas do modelo de consumo adaptado à carga para o enlace 1 para 1, 2 e 3 estágios de comutação. (Curva AMS-IX)

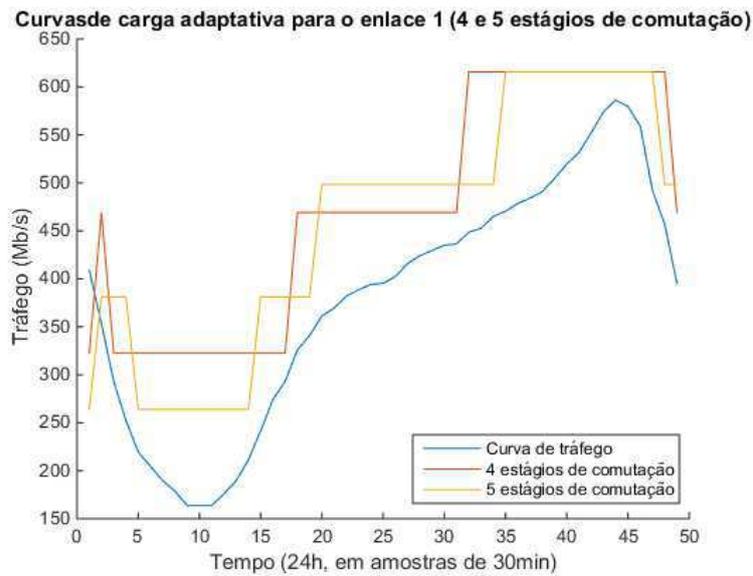


Figura 18: Curvas do modelo de consumo adaptado à carga para o enlace 1 para 4 e 5 estágios de comutação. (Curva AMS-IX)

5.2 Consumo de energia da rede em função do número de estágios de comutação

Os valores obtidos para o consumo do enlace 1 da rede da Figura 9 de acordo com o número de estágios encontram-se na Tabela X e XI. Os gráficos podem ser vistos nas Figuras 19 e 20.

A partir da observação dos resultados é possível afirmar que o modelo de consumo adaptado à carga pode oferecer ganhos significativos quanto à eficiência energética do sistema. Entretanto, como previsto pelo modelo teórico, à medida que o número de estágios aumenta o retorno em economia diminui, o que significa que há um ponto ótimo a ser encontrado para a operação do sistema, levando em consideração os ganhos a serem obtidos em contrapartida com complexidade e os custos de implementar essa solução.

Tabela X: Consumo de energia elétrica da rede em função do número de estágios de comutação (Curva LND-IX).

Nº de estágios	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Consumo ($10^5 \times \text{Wh}$)	4,67	4,06	3,95	3,74	3,54	3,44	3,40	3,37	3,34	3,30
Nº de estágios	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Consumo ($10^5 \times \text{Wh}$)	3,26	3,23	3,23	3,22	3,22	3,22	3,21	3,18	3,17	3,19
Nº de estágios	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Consumo ($10^5 \times \text{Wh}$)	3,17	3,19	3,17	3,15	3,12	3,12	3,10	3,08	3,08	3,08

Tabela XI: Consumo de energia elétrica da rede em função do número de estágios de comutação (Curva AMS-IX).

Nº de estágios	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Consumo ($10^5 \times \text{Wh}$)	4,65	4,00	3,75	3,58	3,47	3,35	3,33	3,27	3,24	3,21
Nº de estágios	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Consumo ($10^5 \times \text{Wh}$)	3,20	3,15	3,15	3,14	3,14	3,10	3,11	3,10	3,10	3,08
Nº de estágios	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Consumo ($10^5 \times \text{Wh}$)	3,07	3,06	3,02	3,03	3,02	3,02	3,00	2,99	2,99	2,97

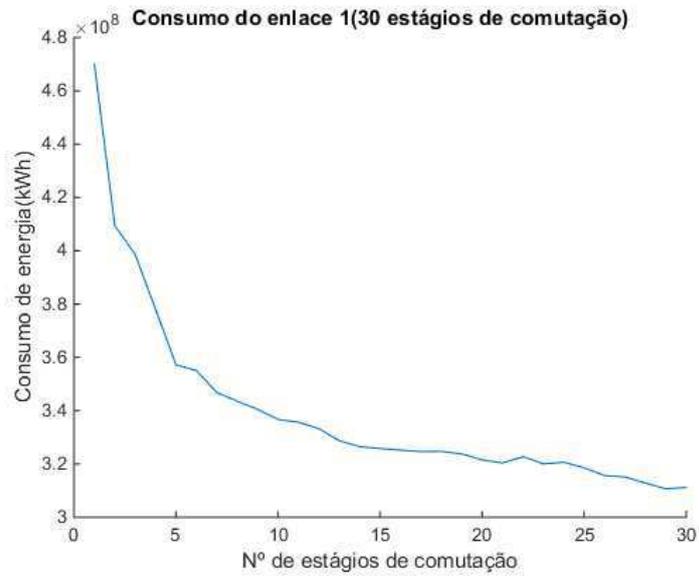


Figura 19: Consumo do enlace 1 em kWh em função do nº de estágios de comutação do modelo de consumo adaptado à carga (30 estágios - Curva LND-IX).

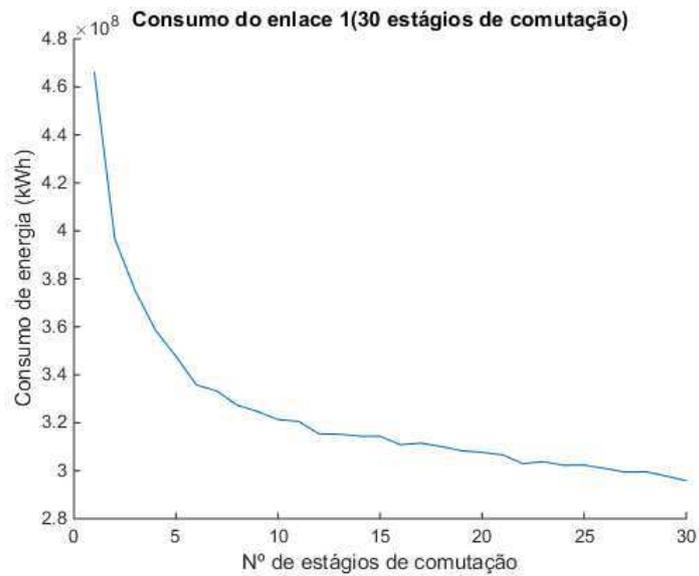


Figura 20: Consumo do enlace 1 em kWh em função do nº de estágios de comutação do modelo de consumo adaptado à carga (30 estágios - Curva AMS-IX).

6 Conclusão

O código desenvolvido apresentou um desempenho dentro do esperado, não obstante as pequenas falhas com relação ao período de validade do método do consumo adaptado à carga. Os resultados obtidos foram coerentes com o esperado a partir da análise teórica.

Ao longo do processo, ficou evidente que a maior dificuldade para a aplicação dessa técnica é a necessidade de uma grande quantidade de dados precisos acerca das grandezas utilizadas para modelar a rede. Assim, melhoras podem ser feitas para permitir um processo mais fácil de entrada de dados.

Outras melhorias seriam um processo de expansão dos vetores utilizados no código para permitir opções como curvas de tráfego específicas para cada enlace, uma opção que não é possível no momento. Ainda, o modelo desenvolvido não leva em consideração as perdas que podem ocorrer no sistema por causa da comutação, assim como uma possível perda na qualidade do serviço decorrente da alteração da capacidade oferecida ao usuário.

O estágio permitiu um aprendizado mais aprofundado sobre a forma como estão organizadas as redes de telecomunicações utilizadas atualmente, além de apresentar oportunidades de resolver desafios que não são encontrados em outros pontos da graduação. Os conhecimentos adquiridos até então em variadas disciplinas foram de suma importância, permitindo um dinamismo no processo de solução de problemas e servindo como uma base de conhecimento para encontrar ferramentas que possibilitassem a implementação das soluções encontradas.

7 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.

Anexo I - Código de análise do sinal óptico

```
1
2 function [links_traffic ,...
3          consumo,stages ,...
4          bitcost_high ,...
5          bitcost_low] = energy_consumption(traffic ,...
6                                          distances ,...
7                                          users ,...
8                                          L ,...
9                                          curve ,...
10                                         LoRoPower ,...
11                                         CoRoPower ,...
12                                         FiberPower ,...
13                                         DesktopPower ,...
14                                         CellPower)
15 [T1,~] = size(curve);
16
17 T = T1-1; %ajuste do indice da matriz com a curva de trafego
18
19 traffic_curve_notnorm = curve(:,2);
20
21 traffic_curve = traffic_curve_notnorm./max(traffic_curve_notnorm);
22
23 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
24
25 [no_links ,~] = size(distances); %obtencao das dimensoes para o problema
26 [dim_traffic ,~] = size(traffic);
27
28 control = 0;
29
30 %indexacao dos enlaces
31 for ka = 1:dim_traffic
32     for kb = 1:dim_traffic
33         if(traffic(ka,kb)~=0)
34             control = control + 1;
35             traffic_nondiag(control) = traffic(ka,kb);
36         end
37     end
38 end
39
40 %atribuicao da curva de trafego para cada enlace
41 links_traffic = zeros(no_links ,T+1);
42
43 for k7 = 1:no_links
44     links_traffic(k7,:) = traffic_nondiag(k7)*traffic_curve;
45 end
46
47 %calculo do modelo de carga adaptativa para cada enlace
48 stages = zeros(L,T+1,no_links);
49
50 for k9 = 1:no_links
51     capacity_link = load_adaptative(L,T,links_traffic(k9,:));
52     stages(:, :, k9) = capacity_link;
53 end
54
```

```

55 %calcula do consumo a partir das curvas de cada enlace para cada no de
56 %estagios de comutacao
57 consumo1 = zeros(L,no_links);
58
59 for k12=1:L
60     consumo1(k12,:) = trapz(stages(k12,:,:));
61 end
62
63 for k13=1:no_links
64     consumo_norm(:,k13) = consumo1(:,k13)/max(consumo1(:,k13));
65 end
66
67 %determinacao do no de enlaces para cada no da rede
68 control1 = 1;
69 for kd=1:dim_traffic
70     for kc=1:dim_traffic
71         if(traffic(kd,kc)~=0)
72             control2 = 0;
73             for ke = 1:dim_traffic
74                 if(traffic(kd,ke)~=0)
75                     control2 = control2 + 1;
76                 end
77             end
78             no_links_node(control1) = control2;
79             control1 = control1 + 1;
80         end
81     end
82 end
83
84 %distribuicao dos usuarios de cada no pelo no de enlaces
85 users_uniform = users(:,1)./no_links_node(:,1);
86
87 %determinacao do no de usuarios por enlace
88 control = 1;
89 for kd=1:dim_traffic
90     for kc=1:dim_traffic
91         if(traffic(kd,kc)~=0)
92             users_links(control) = users_uniform(kd) +
93             users_uniform(kc);
94             control = control + 1;
95         end
96     end
97 end
98 %calcula da potencia dos usuarios(triple play)
99 P_users = (LoRoPower+2*DesktopPower+2*CellPower).*users_links;
100
101 %potencia do nucleo – modelo AMS-IX
102 for ke = 1:no_links
103     P_core(ke) = 4*CoRoPower;
104 end
105
106 %potencia pelo comprimento da fibra
107 for kf = 1:no_links
108     P_transport(kf) = FiberPower*(distances(kf,1)/1000);
109 end
110
111 %energia consumida por enlace
112 E_link = (P_users + P_transport + P_core);

```

```

113
114 %atribuicao do consumo apropriado para cada enlace
115 for kf = 1:no_links
116     consumo(:,kf) = E_link(kf)*consumo_norm(:,kf);
117 end
118
119 %criacao do vetor com o trafego de cada enlace (trafego simetrico)
120 control = 1;
121 for kd =1:dim_traffic
122     for kc=1:dim_traffic
123         if(traffic(kd,kc)~=0)
124             bps_links(control) = traffic(kd,kc)*1e6*2*86400;
125             control = control+1;
126         end
127     end
128 end
129
130 bitcost_high = 3600*consumo(1,:)./(bps_links);
131 bitcost_low = 3600*consumo(L,:)./(bps_links);
132
133 (P_core+P_transport)/E_link;
134 P_users/E_link;

```

Anexo II - Função para o cálculo das curvas do modelo de consumo adaptado à carga

```
1
2 function capacidade_estagios = load_adaptative(L,T,traffic)
3
4 no_intervalos = [1:1:L];
5
6 passo = max(traffic)./no_intervalos; %tamanho do passo para cada no. de
7                                     %estagios de comutacao
8
9 capacidade_projetada(1:T+1) = max(traffic) + 0.05*max(traffic);
10
11 capacidade_estagios = zeros(L,T+1);
12
13 for k1 = 1:L
14
15     P = 0;
16     M = 1;
17
18     for k2 = 1:T+1
19
20         if(traffic(k2) > P*passo(k1))&&(traffic(k2) <= M*passo(k1))
21             capacidade_estagios(k1,k2)= M*passo(k1) + 0.05*max(traffic)
22         ;
23         else
24
25             if(traffic(k2) > M*passo(k1))
26                 capacidade_estagios(k1,k2)= (M + 1)*passo(k1) + 0.05*
27                 max(traffic);
28                 P = M;
29                 M = M + 1;
30             else
31                 capacidade_estagios(k1,k2)= (M - 1)*passo(k1) + 0.05*
32                 max(traffic);
33                 M = P;
34                 P = P - 1;
35             end
36         end
37     end
38 end
```