



## ANÁLISE E REDUÇÃO DO CONSUMO ENERGÉTICO EM REDES BACKBONE IP/MPLS

Bruno Peres

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador: Luís Henrique Maciel Kosmalski  
Costa

Rio de Janeiro  
Março de 2018

ANÁLISE E REDUÇÃO DO CONSUMO ENERGÉTICO EM REDES  
BACKBONE IP/MPLS

Bruno Peres

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA (COPPE) DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA ELÉTRICA.

Examinada por:

---

Prof. Luís Henrique Maciel Kosmalski Costa, Dr.

---

Prof. Célio Vinicius Neves de Albuquerque, Ph.D.

---

Prof. Pedro Braconnot Velloso, Dr.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL

MARÇO DE 2018

Peres, Bruno

Análise e Redução do Consumo Energético em Redes Backbone IP/MPLS/Bruno Peres. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2018.

XII, 44 p.: il.; 29, 7cm.

Orientador: Luís Henrique Maciel Kosmalski Costa

Dissertação (mestrado) – UFRJ/COPPE/Programa de Engenharia Elétrica, 2018.

Referências Bibliográficas: p. 41 – 44.

1. Redes verdes. 2. Medições em redes. 3. Redes *backbone*. I. Maciel Kosmalski Costa, Luís Henrique. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Elétrica. III. Título.

*Aos meus pais, Lilian e Alecy,  
minha esposa Sara e meu filho  
Théo.*

# Agradecimentos

Agradeço meus pais, Lilian e Alecy, por sempre me mostrarem o valor da educação e sempre me apoiarem, desde o primeiro momento quando saí de minha cidade natal para fazer a faculdade de Engenharia em outra cidade.

Agradeço também minha esposa Sara pelo apoio, compreensão e suporte nas várias noites que estive focado nos afazeres para obtenção do título de Mestre. Agradeço também o carinho de meu pequeno Théó, que embora ainda não seja capaz de compreender, me motiva e me fortalece para buscar sempre o meu melhor e servir de exemplo para ele.

Agradeço a toda a equipe do Grupo de Teleinformática e Automação pela confiança depositada, desde a seleção feita no processo seletivo, assim como nas muitas difíceis etapas para alcançar o resultado final desta dissertação. A todos funcionários da secretaria do Programa de Engenharia Elétrica (PEE), em especial Mauricio e Daniele, por todo o suporte à mim e a todos os outros alunos do programa. Em especial ao meu orientador Luís Henrique, que esteve do meu lado pacientemente durante esta jornada e acreditou em mim, mesmo nos períodos mais críticos e difíceis nesta jornada.

Em especial agradeço a toda a equipe do Centro de Referência Tecnológica (CRT) da Embratel, que sempre me proporcionou um ambiente de trabalho saudável, propício para o autodesenvolvimento e fortalecimento das relações pessoais, em especial ao José Silva, Antônio Silvério e Walderson Vidal, que foram os primeiros a me incentivarem a ingressar no curso de mestrado. Toda a equipe de responsáveis técnicos, Luiza, Carolina, Joaquim, Mauro, Aldair, Rodrigo, Anderson e Leon, que literalmente “seguraram a barra” enquanto estive nas aulas durante o expediente de trabalho.

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

## ANÁLISE E REDUÇÃO DO CONSUMO ENERGÉTICO EM REDES BACKBONE IP/MPLS

Bruno Peres

Março/2018

Orientador: Luís Henrique Maciel Kosmowski Costa

Programa: Engenharia Elétrica

A cada nova geração de roteadores de grande porte, o consumo de energia tem aumentado. Além disto, o custo da energia tem ficado cada vez mais cara no Brasil. Nesta dissertação, apresenta-se uma análise de um período de três anos do consumo de eletricidade do laboratório de telecomunicações de uma grande empresa provedora de serviços. Posteriormente, foi analisado especificamente o consumo dos roteadores de *backbone* do laboratório. Foram consideradas mais de 17 mil leituras em 28 dias de monitoração do consumo dos 26 roteadores que compõem a rede *backbone* do laboratório, contemplando durante este período de monitoração um estado de atividade normal da rede e posteriormente, momentos onde foi gerado um tráfego adicional para analisar o impacto deste no consumo energético dos roteadores, diferenciando este tráfego gerado em protocolos de transporte e aplicação. Assim, foram estudadas formas de redução no consumo de energia da rede, com análises do consumo em relação ao tráfego e desligamento de placas. Os resultados mostram que existem oportunidades para economia de energia com uma melhor utilização e alocação dos recursos dos roteadores sem comprometer o desempenho da rede, sendo possível gerar uma economia de 4,3% no consumo total do *backbone*, gerando uma economia efetiva no valor pago à concessionária de energia elétrica. As leituras obtidas foram cruzadas com os dados de cobrança da empresa concessionária de energia para se mensurar o custo para manter uma rede *backbone* operacional. Em seguida é apresentado um modelo de serviço consciente do ponto de vista energético, onde é possível estender estes resultados obtidos na dissertação para usuários comerciais que possuem horário de funcionamento fixo.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

## ANALYSIS AND REDUCTION OF ENERGY CONSUMPTION IN BACKBONE IP/MPLS NETWORKS

Bruno Peres

March/2018

Advisor: Luís Henrique Maciel Kosmowski Costa

Department: Electrical Engineering

High capacity routers are consuming more power over the years. In addition, the cost of energy has become increasingly expensive in Brazil. In this dissertation, an analysis of a three-year period of the electricity consumption of the telecommunication laboratory of a large service provider is presented. Subsequently, the consumption of the backbone routers from the laboratory was analyzed. We considered more than 17 thousand readings in 28 days of power consumption monitoring of the 26 routers that make up the laboratory backbone network, contemplating during this monitoring period a normal activity state of the network and later, an additional traffic was generated to analyze the impact on the energy consumption of the routers, differentiating this traffic generated in transport and application protocols. Thus, ways of reducing the network energy consumption were studied. The results show that there are opportunities for energy savings with better utilization and allocation of routers resources without compromising network performance, resulting in savings of 4.3% in the total consumption of the backbone, generating a effective savings in the amount paid to the electric energy company. The readings obtained were cross-checked with the utility's billing data to measure the cost to maintain an operational backbone network. Finally, an energy-conscious service model is presented, where it is possible to extend the results obtained in the dissertation to commercial users who have fixed hours of operation.

# Sumário

<b>Lista de Figuras</b>	<b>ix</b>
<b>Lista de Tabelas</b>	<b>x</b>
<b>Lista de Abreviaturas</b>	<b>xi</b>
<b>1 Introdução</b>	<b>1</b>
<b>2 Trabalhos Relacionados</b>	<b>6</b>
2.1 Análises baseadas em modelos teóricos . . . . .	6
2.2 Análises baseadas em experimentos práticos . . . . .	7
2.3 Economia de energia em redes de datacenter . . . . .	10
2.4 Características da análise realizada . . . . .	10
<b>3 Cenário de Experimentação</b>	<b>12</b>
<b>4 Análise do Consumo Energético</b>	<b>18</b>
4.1 Coleta de Dados . . . . .	21
4.2 Geração de Tráfego . . . . .	22
4.3 Desligamento de placas . . . . .	25
<b>5 Resultados Experimentais</b>	<b>29</b>
5.1 Consumo com Geração de Tráfego . . . . .	29
5.2 Consumo com Desligamento de Placas . . . . .	32
5.3 Consumo da Rede . . . . .	35
<b>6 Conclusões</b>	<b>38</b>
<b>Referências Bibliográficas</b>	<b>41</b>

# Lista de Figuras

3.1	Gasto mensal com energia. . . . .	14
3.2	Consumo mensal com energia do laboratório. . . . .	15
3.3	Valor unitário cobrado pela empresa distribuidora de energia. . . . .	16
4.1	Topologia da rede de <i>backbone</i> estudada. . . . .	19
4.2	Cenário 1: tráfego gerado passando por toda a rede. . . . .	23
4.3	Cenário 2: avaliação de consumo em função do tráfego para um único elemento. . . . .	24
4.4	Média de consumo de cada modelo de roteador. . . . .	26
4.5	Consumo de cada modelo de roteador no total de consumo do <i>backbone</i> . . . . .	27
5.1	Média de consumo do UACC02. . . . .	30
5.2	Média de consumo do roteador UACC03. . . . .	30
5.3	Média de consumo do roteador UACC04. . . . .	32
5.4	Média de consumo dos roteadores GACC01, XACC02 e XACC01. . . . .	33
5.5	Média de consumo da rede <i>backbone</i> . . . . .	35
5.6	Custo da rede backbone por hora. . . . .	36

# Lista de Tabelas

4.1	Inventario dos roteadores do <i>backbone</i> . . . . .	20
4.2	Tabela de tráfego gerado. . . . .	25
4.3	Modelos de roteadores que compõem a rede <i>backbone</i> do laboratório. .	26
5.1	Configurações de placas dos roteadores 7609-S. . . . .	34
5.2	Consumo e custo dos roteadores no período sem inserção de tráfego. .	37

# Lista de Abreviaturas

**NASA** *National Aeronautics and Space Administration*

**SIGCOMM** *Special Interest Group on Data Communication*

**ONU** *Organização das Nações Unidas*

**ProGD** *Programa de Desenvolvimento da Geração Distribuída de Energia Elétrica*

**ICMS** *Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Serviços*

**BNDES** *Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social*

**UFRJ** *Universidade Federal do Rio de Janeiro*

**AS** *Autonomous System*

**OTN** *Optical Transport Networking*

**DWDM** *Dense Wavelength Division Multiplexing*

**HFC** *Hybrid Fiber-Coaxial*

**NGN** *Next Generation Network*

**IMS** *IP Multimedia Subsystem*

**SBC** *Session Border Controller*

**ANEEL** *Agência Nacional de Energia Elétrica*

**TE** *Tarifa de Energia elétrica*

**TUSD** *Tarifa de Uso dos Sistemas de Distribuição*

**SIP** *Session Initiation Protocol*

**CMTS** *Cable Modem Termination System*

**SSH** *Secure Shell*

**SNMP** *Simple Network Management Protocol*

**MIB** *Management Information Base*

**MTU** *Maximum Transfer Unit*

**RTP** *Real-time Transport Protocol*

**CSV** *Comma Separated Values*

# Capítulo 1

## Introdução

Atualmente, vive-se em um mundo cada vez mais preocupado com o futuro e com as consequências que virão das atitudes hoje tomadas em relação ao meio ambiente e consumo dos recursos naturais. Os efeitos das mudanças climáticas são cada vez mais amplamente divulgados. Apenas para dar um exemplo, a NASA (*National Aeronautics and Space Administration*) possui uma página específica para a divulgação de dados relacionados aos efeitos das mudanças climáticas [1] e quais as consequências destas alterações no planeta. Na academia, vale a pena citar o *workshop* que aconteceu em 2010 durante a conferência do SIGCOMM (*Special Interest Group on Data Communication*) em Nova Deli. O *Green Networking* [2] foi o primeiro *workshop*, dentro de um dos principais congressos da área, para tratar especificamente de estudos sobre medidas sustentáveis no ambiente de comunicação de dados. Um dos fatores que corrobora o aumento destes efeitos climáticos é a crescente demanda por energia. Considerando especificamente as redes de *backbone* onde trafegam grandes massas de dados, a cada nova geração de roteadores, a demanda por energia aumenta, seja por novas facilidades implementadas, pelo aumento da capacidade de encaminhamento de tráfego ou até mesmo no aumento de tamanho dos roteadores, com alguns modelos ocupando totalmente um *rack*, como o recentemente lançado Cisco NCS 6000 [3].

Por outro lado, há um consenso de que a quantidade de dados trafegados na Internet só tende a crescer. Para ilustrar, a empresa Cisco possui um estudo (*Cisco Visual Networking Index* [4]) onde é feita uma previsão do crescimento do consumo de dados na Internet. Segundo este estudo, de 2016 até 2021, o tráfego global da Internet terá crescido 3,2 vezes, com uma média de crescimento anual de 26% [4]. Em 2016, 22% do tráfego da Internet foi transportado através de redes metropolitanas, a previsão em 2021 é de que este percentual suba para 35% [4]. Destes dados, pode-se perceber que em um futuro próximo, haverão mais dados trafegando na rede e que cada vez mais existirão roteadores ou *data centers* espalhados geograficamente, principalmente em regiões metropolitanas para atender a demanda crescente da

Internet. Quando analisada a previsão somente do Brasil, de 2016 até 2021, o tráfego da Internet crescerá 2,3 vezes, com uma taxa de crescimento anual de 18% [4].

Estudos mostram que o consumo de energia da Internet representa entre 1% a 2% do total de energia consumida em países onde a população possui acesso a banda larga, conforme mostrado por [5], [6] e [7]. Segundo [8], há três razões para o crescimento do “consumo de energia da Internet”: o número crescente de dispositivos, o aumento da demanda por energia destes dispositivos e o aumento no número de horas que as pessoas se conectam. Considerando, por outro lado, as grandes redes de interconexão da Internet, que são de responsabilidade das operadoras de telecomunicações, outro fator que torna o uso da energia elétrica pouco eficiente nas chamadas redes de *backbone* é o seguinte: estas redes são dimensionadas para suportar uma capacidade enorme de dados, porém em poucos momentos ao longo do tempo é requerido da rede a sua capacidade total de tráfego. Em outras palavras, frequentemente as redes são projetadas com capacidade suficiente para suprir, no mínimo, a demanda de pico. Esta técnica é comumente chamada de *over-provisioning* ou superdimensionamento. Embora a prática se justifique porque minimiza a ocorrência de congestionamento nas redes de *backbone*, por outro lado causa uma enorme ociosidade da capacidade de transmissão dos enlaces e, conseqüentemente, um desperdício de energia elétrica.

O governo brasileiro vem, desde dezembro de 2015, financiando a compra de placas solares para reduzir as emissões dos gases que causam o efeito estufa. Em cumprimento à meta estabelecida pela Organização das Nações Unidas (ONU), isto significa reduzir estes gases em relação aos níveis de 2005, em 37% até 2025 e em 43% até 2030 através do Programa de Desenvolvimento da Geração Distribuída de Energia Elétrica (ProGD) do Ministério de Minas e Energia [9]. O programa conta basicamente com incentivos fiscais para pessoas físicas e jurídicas que queiram investir em painéis solares, isentando a cobrança do Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Serviços (ICMS), redução do imposto de importação e disponibilizando financiamento através do Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES). Por outro lado, conforme será comprovado mais adiante neste trabalho, o governo brasileiro realizou a re-tarifação da energia elétrica no primeiro trimestre de 2015, o que fez com que o preço da energia aumentasse nos últimos dois anos. O aumento do custo da eletricidade atingiu tanto pessoas físicas quanto empresas, incluídas as operadoras de telecomunicações. O aumento foi também motivado pela crise hídrica que o país começou a enfrentar: com períodos menores e de pouca chuva, os reservatórios das hidrelétricas não eram suficientes para que elas conseguissem gerar energia e atender toda a demanda. Assim, outras fontes de energia mais caras, como as usinas termoeletricas tiveram que sustentar essa diferença entre a demanda e a geração de energia.

As próprias empresas fornecedoras de equipamentos de redes demonstram certa preocupação em relação ao consumo de energia de seus equipamentos. A Cisco, por exemplo, passou a fornecer uma aplicação chamada *Cisco Power Calculator* [10], onde através de uma interface Web é possível simular o consumo de diferentes linhas de roteadores, sendo possível fazer o preenchimento dos roteadores com as placas existentes no mercado. Uma vez feita a configuração desejada do roteador, a calculadora informa a quantidade máxima teórica de potência consumida, o total de corrente previsto e também a quantidade de calor dissipada para a configuração inserida. De fato, a dissipação de calor é uma preocupação tão grande quanto a implantação dos roteadores em uma rede *backbone*. Além dos roteadores precisarem desta climatização para operarem de forma correta, os equipamentos necessários para esta climatização também possuem uma grande demanda de energia.

Estudos na literatura mostram que os roteadores aumentam muito pouco o seu consumo em função do tráfego, em alguns casos, mesmo com tráfego em 100% da sua capacidade, os roteadores aumentam somente 10% de seu consumo, conforme mostrado por VAN HEDDEGHEM *et al.* [11]. A maneira mais eficaz para redução do consumo de roteadores é o desligamento total ou de parte de suas funcionalidades (placas) para uma redução considerável do consumo de energia. Muitos estudos desenvolvem mecanismos, algoritmos e protocolos para que em momentos de ociosidade da rede, alguns nós sejam desligados ou colocados em um modo de baixo consumo de energia (“*sleep mode*”) e que em casos de aumento da demanda de tráfego, o próprio mecanismo desenvolvido seja capaz de “acordar” estes roteadores para atender esta demanda, sem prejudicar o desempenho da rede. A maior dificuldade é no desenvolvimento deste mecanismo, uma vez que esta decisão de quais enlaces ou nós podem ser retirados da rede é um problema NP-completo conforme mostrado por [12] e [13]. Muitos destes trabalhos da literatura se utilizam de simulações e de matrizes de tráfego de redes reais para a validação dos algoritmos, o que pode causar uma grande diferença em um cenário real. Os poucos trabalhos que se utilizam roteadores reais para esta validação, utilizam poucos roteadores, no maior caso visto na literatura, VAN HEDDEGHEM *et al.* [11] utilizou quatro roteadores para a avaliação do consumo de energia. O diferencial do presente trabalho, além do vasto período de coleta de dados de roteadores reais é a coleta de uma diversidade enorme de roteadores, com diferentes capacidades, modelos, sistemas operacionais, placas e funcionalidades, mostrando que em alguns casos, um único roteador pode consumir mais de 2.800,00 Watts por hora, fazendo com que os resultados obtidos nesta dissertação sejam totalmente práticos e aplicáveis em um ambiente real de uma rede *backbone* de grande porte.

Nesta dissertação, estudou-se o gasto de energia do laboratório de uma empresa provedora de serviços, laboratório instalado dentro do Parque Tecnológico da Uni-

versidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ). A estrutura do laboratório em questão conta com diversos equipamentos para realização de testes de novas funcionalidades, testes de compatibilidades e homologação de novos equipamentos e funcionalidades para o ambiente operacional da empresa. A principal função estratégica do laboratório para a empresa é justamente fornecer uma segurança para estes testes serem realizados fora do ambiente operacional, evitando que qualquer problema que possa acontecer afete o cliente e/ou usuário final. Além da rede *backbone* presente no laboratório, também existem equipamentos para transmissão de dados a longas distâncias como as redes ópticas e também redes de telefonia para realização de testes de novos protocolos de sinalização e testes de novos *releases* de *software*. O laboratório foi instalado em 2001 no Parque Tecnológico da UFRJ e possui uma área de 30.000 metros quadrados. A decisão da instalação do laboratório dentro do Parque Tecnológico da UFRJ foi uma decisão estratégica para propiciar a troca de informações do ambiente acadêmico com o empresarial, viabilizando aos estudantes vivenciarem um ambiente empresarial e possibilitar o “*hands on*” em equipamentos reais. O investimento inicial para equipar o laboratório foi de cerca de US\$ 2 milhões e segundo descrito na carta de apresentação do laboratório, atualmente o patrimônio do laboratório é de aproximadamente US\$ 30 milhões entre equipamentos comprados, doações e contratos de comodato [14]. Foi analisado o histórico de três anos da conta de energia elétrica do laboratório, verificando o consumo mensalmente, assim como o valor cobrado pela concessionária de energia elétrica e como a combinação do aumento do consumo do laboratório e o aumento da tarifa cobrada resultou no aumento da conta de luz neste período. Após esta análise, foi avaliado especificamente o consumo da rede *backbone* presente no laboratório, desenvolvendo um *script* para a coleta de dados automaticamente em cada um dos 26 roteadores. Foram realizadas análises do consumo dos roteadores sem estressar a rede do laboratório para entender o seu consumo sem nenhuma alteração externa e em um segundo momento foram realizados experimentos gerando tráfego para verificar o comportamento da demanda por energia em função da carga da rede, diferenciando este tráfego gerado de diversas formas para verificação de alguma alteração no consumo. Em seguida, identificou-se alguns pontos da rede onde havia oportunidade para economia de energia e redução do consumo de três roteadores. Com os dados de consumo da rede *backbone*, também foi avaliado o custo da rede em função dos valores obtidos da análise da conta da empresa concessionária de energia e computado o quanto a redução do consumo do teste feito gerou em economia.

Essa dissertação está organizada da seguinte forma. No Capítulo 2 são apresentados os principais trabalhos relacionados encontrados na literatura. O Capítulo 3 apresenta uma análise do cenário do consumo de energia do laboratório. O Capítulo 4 fornece os detalhes da rede *backbone* utilizada neste estudo, assim como

a metodologia de geração do tráfego para avaliação do comportamento do consumo de energia da rede e como os dados foram coletados para análise, assim como os roteadores que foram selecionados para desligamento de placas. No Capítulo 5 são mostrados os resultados obtidos com as leituras coletadas sobre o consumo dos roteadores. Finalmente, no Capítulo 6 são apresentadas as conclusões obtidas nesta dissertação, assim como as direções futuras do trabalho.

# Capítulo 2

## Trabalhos Relacionados

A área de pesquisa sobre o consumo energético em redes de comunicação é um tópico extenso, com interesse crescente da comunidade científica. Uma demonstração desta importância está nas diversas conferências e congressos que já possuem o tópico “*green networking*” conforme dito no Capítulo 1. Existem diversas abordagens presentes na literatura para estudarem formas de economia de energia em redes. Este capítulo destaca as contribuições mais próximas desta dissertação.

### 2.1 Análises baseadas em modelos teóricos

Um dos trabalhos pioneiros sobre o consumo de energia da Internet foi apresentado por Gupta e Singh [15] na ACM SIGCOMM 2003. Neste trabalho, foram realizadas análises de diferentes oportunidades para se gerar economia de energia na Internet. Os autores concluem que a melhor forma de um roteador economizar energia seria colocar alguns ou todos seus componentes em um modo *sleep* ou de baixo consumo. Um dos pontos de atenção para esta atitude é que quando algum componente for colocado neste modo de pouca energia, pode haver momentos onde haja uma demora no tempo de resposta da rede, caso o roteador demore a “acordar” deste modo *sleep*. Para simular esta abordagem foram usados exemplos de tráfego dentro do sistema autônomo (AS – *Autonomous System*) da Universidade de Portland, em uma tentativa de colocar os roteadores em modo *sleep* de forma coordenada e não coordenada. Uma das dificuldades encontradas para uma política coordenada é que os próprios protocolos de roteamento deveriam sofrer alterações e deveriam levar em consideração o consumo dos roteadores para tomar esta decisão de quais interfaces podem ser colocadas em modo *sleep*. De algum modo, seria necessário uma decisão centralizada para identificar quais interfaces ou roteadores seriam desligados e ligados, levando-se em conta o tráfego da rede. O protocolo de roteamento deve ter a capacidade de manter e atualizar a topologia da rede em todos os roteadores a medida que decisões de desligamento ou ligamento de novos enlaces e roteadores sejam

tomadas, evitando inconsistências e rotas incorretas nas tabelas de roteamento.

O trabalho de Gupta e Singh [15] foi um dos primeiros da literatura a atacar o problema do consumo de energia da Internet, fazendo uma abordagem analisando os impactos e as alterações necessárias que os protocolos existentes necessitam para gerar economia de energia. Entretanto, não foi feita nenhuma análise prática, com medidas de equipamentos reais, ao contrário desta dissertação. Na Seção seguinte, serão analisados trabalhos que possuem dados e medidas de equipamentos reais.

O trabalho realizado por Fisher *et al.* [13] diferencia-se por tentar reduzir a quantidade de interfaces ligadas em uma agregação de enlaces, nos momentos de ociosidade da rede, para gerar economia de energia. Inicialmente, foi mostrado que o desenvolvimento de um algoritmo ótimo para maximizar a quantidade de enlaces que devem ser desligados em momentos de baixa utilização da rede é um problema NP-completo. Levou-se em consideração um grafo genérico  $G$  com  $V$  roteadores e  $E$  enlaces, de modo que  $c(u, v)$  é a capacidade de cada enlace entre dois roteadores  $u, v$ . Cada enlace consiste em  $B$  cabos, que podem ser desligados independentemente.  $D$  representa a demanda entre dois roteadores, representado pelos valores  $s_d, t_d$  e  $h_d$  que representam a origem da demanda, destino da demanda e a demanda de tráfego. A solução buscada é a minimização do valor  $n_{uv}$  que representa o número de cabos ligados no link  $(u, v)$ . Dessa forma, os autores desenvolveram três heurísticas para serem testadas. As três heurísticas são variações do algoritmo de Greedy que variam basicamente na ordem em que os cabos são considerados e também no número de combinações de cabos consideradas para remoção. Estas heurísticas foram implementadas em AMPL (*A Mathematical Programming Language*) e testadas em uma implementação da topologia de uma rede *backbone* desenvolvida por um grupo de estudos da década de 90 chamada Abilene. Embora os resultados apresentem uma grande capacidade na redução do consumo com as heurísticas apresentadas, podendo chegar em uma economia de 73% no caso da topologia Abilene na simulação onde as interfaces agregadas são compostas por três enlaces cada, não há nenhuma implementação real destes algoritmos para validação da simulação feita.

## 2.2 Análises baseadas em experimentos práticos

Os trabalhos de [16] e [11] mostram resultados práticos, com estudos baseados em roteadores reais, assim como nesta dissertação.

Em [16] os autores mostram duas direções que acreditam poder resultar em grandes reduções no consumo energético em redes: projeto de redes conscientes e protocolos de rede conscientes do ponto de vista energético. Eles mostraram que atualmente os roteadores possuem placas ASIC (*Application Specific Integrated Circuits*) que promoveram o aumento da capacidade de tráfego dos roteadores sem

que o consumo dos mesmos aumentasse na mesma ordem de grandeza. Conforme mostrado pelos autores, entre 1998 e 2006, a potência gasta por *byte* transmitido foi reduzida pela metade a cada dois anos, porém o aumento da capacidade de tráfego foi maior do que esta redução. Dessa forma, o consumo de novas gerações de roteadores aumenta, mas não na mesma ordem que sua capacidade de tráfego. Os autores de [16] usaram dois roteadores reais, Cisco GSR 12008 e Cisco 7507, para estudar o consumo de roteadores de grande porte. Chegaram à conclusão de que nos dois casos o sistema básico para o roteador funcionar (o chassis e uma placa processadora) representa mais da metade do consumo total do roteador. Assim, concluíram que para gerar economia de energia é melhor minimizar a quantidade de roteadores ligados e maximizar a quantidade de enlaces (*links*) por chassis. Em outras palavras, é mais eficiente do ponto de vista energético, um único roteador com 16 enlaces ao invés de dois com 8 enlaces cada. Entretanto isso está diretamente ligado com a capacidade projetada por cada fabricante e da configuração de *hardware* de cada roteador em função das placas equipadas. Um ponto negativo de uma possível configuração deste tipo é a centralização de funções de rede em um único ponto, de modo que em uma possível falha generalizada neste único roteador pode ocasionar uma falha grave na rede. Outro teste realizado foi a geração de tráfego através de vinte estações de trabalho atravessando dois roteadores reais, gerando tráfego através de um programa chamado Harpoon, avaliando o consumo real de um roteador Cisco 12000. Assim como nesta dissertação, inicialmente foi considerado o consumo do roteador em um momento de ociosidade e foram gerados pacotes para avaliar o crescimento do consumo, mostrando que no pior cenário houve um aumento de somente 20 watts no consumo do roteador. Outro resultado mostrado, é que há um pequeno aumento no consumo do roteador a medida que o tamanho dos pacotes diminui, aumentando a quantidade de pacotes enviados e recebidos, porém este aumento não chegou a 10 watts. Com base no teste com geração de tráfego através destas estações de trabalho, gerou-se uma equação para o modelo de consumo do roteador. O modelo desenvolvido leva em consideração uma função que retornava o consumo do chassis do roteador, o número  $N$  de placas ativas do roteador, uma função correspondente ao tráfego do roteador e por fim uma função em relação ao gasto de cada placa do roteador em uma configuração base. Este modelo desenvolvido foi utilizado em ferramentas de otimização para diferentes exemplos de topologia de redes.

Em [11] os autores realizaram um estudo com roteadores reais de diferentes fabricantes, um Cisco CRS-3 e um Juniper TI600, mas também com comutadores WDM (*Wavelength Division Multiplexing*) e amplificadores ópticos. Uma abordagem interessante apresentada pelos autores foi calcular o consumo dos dois roteadores à medida que eram ligados placa por placa. Com isso, foi possível calcular o valor de

potência consumida pelo roteador em função da capacidade de tráfego de cada placa ligada. Obteve-se assim uma relação W/Gbps. Mostrou-se ainda que à medida que as novas placas eram ligadas, o valor desta relação diminui, embora o consumo absoluto do roteador aumente. Isto demonstra mais uma vez que boa parte do consumo energético do roteador é em função apenas de estar ligado. Outra análise realizada pelos autores diz respeito ao fator tempo de envelhecimento dos roteadores. Os autores consideraram um tempo de obsolescência de sete anos para os roteadores e calcularam um fator de correção do consumo do roteador com o passar destes sete anos, mostrando que o aumento em função do tempo é pequeno, podendo chegar até 3% no caso do Juniper. Este aumento se dá pelo aumento da temperatura interna dos roteadores com o passar dos anos. Para a análise de geração de tráfego, os autores usaram outros dois roteadores, um Cisco 7606 e um Alcatel-Lucent 7750-SR7. Os autores não descreveram no artigo as características do tráfego gerado, mas mostraram que os roteadores em um estado de ociosidade já consomem 90% de seu consumo total e que os outros 10% são alcançados somente com 100% desta carga de tráfego gerada. Essa dissertação difere da análise de [11] pelo fato de gerar diferentes tipos de tráfego para estressar o consumo dos roteadores, além de aplicar uma política para desligamento parcial de funções de roteadores para gerar economia de energia.

Bianzino *et al.* [17, 18] mostraram uma abordagem usando um conceito de cooperatividade em teoria dos jogos para desenvolver um algoritmo onde os roteadores trocavam informações entre si para mensurar a criticalidade de cada enlace na rede, e chegarem à conclusão de quais podem ser desligados sem alterar o tráfego total da rede. O algoritmo leva em consideração a topologia da rede e o tráfego atual da rede para então começar a identificar os enlaces menos críticos e que podem ser desligados. Para a validação da solução, os autores usaram um dia dos traços coletados da matriz de tráfego de uma empresa provedora de Internet e a rede *backbone* de uma empresa francesa de telecomunicações. A metodologia usada para avaliar o consumo da rede foi através de um modelo sintético de consumo de energia de roteadores, o que pode diferenciar os resultados de roteadores reais. Na descrição deste modelo de consumo utilizado, o valor de potência consumida corresponde a um par de *transponders* e um par de interfaces. Cada *transponder* de 10 Gbps consome 37 Watts e cada porta de 1 Gbps consome 10 Watts. Conforme mostrado por [11], este valor de W/Gbps pode sofrer alteração a medida em que as placas são inseridas nos roteadores, e a tendência é de que a medida que o roteador esteja mais completo de placas, o valor de W/Gbps diminui. Um dos pontos de crítica ao trabalho é de que o algoritmo foi testado somente através de traços do tráfego de um único dia, e se fosse considerado um período mais longo, com maiores oscilações na rede, o resultado poderia ser diferente do apresentado.

## 2.3 Economia de energia em redes de datacenter

Estudos sobre a redução de energia e consumo consciente de energia não estão somente no ambiente de redes *backbone*. O trabalho de SHANG *et al.* [12] mostrou um estudo que só no ano de 2006, nos Estados Unidos, dispositivos de redes em *data centers* consumiram 8 bilhões de kWh. Na maior parte do tempo o tráfego de *data centers* é muito abaixo do tráfego de horários de pico, e esse tráfego pode variar conforme os horários do dia, podendo ter uma hora de maior movimento durante o período “útil” do dia e diminuindo durante a madrugada. Esse fato gera uma oportunidade de economia dos dispositivos que ficam ociosos nestes períodos. Os autores mostraram que o desenvolvimento de um algoritmo de roteamento para decisão de quais enlaces podem ser desligados nestes períodos de ociosidade é um problema NP-completo. O modelo descrito para o roteamento é que para uma dada demanda de tráfego, o algoritmo seja capaz de calcular o número mínimo de quais comutadores precisam estar envolvidos para que um limite de performance seja atingido. Foi desenvolvida uma heurística que inicialmente calcula a vazão da rede. O segundo passo é a retirada gradual dos comutadores da topologia até que a vazão da rede chegue no limiar de desempenho, que pode ser definido dinamicamente. Por último os comutadores removidos são desligados ou colocados em modo *sleep*. Este algoritmo foi simulado em duas topologias de redes de *datacenter*. Os resultados mostraram um potencial de economia de energia dependendo do valor de limiar (*threshold*) para o desempenho da rede, de modo que a medida que este limiar aumenta, o percentual de energia economizada diminui.

## 2.4 Características da análise realizada

Esta dissertação baseia-se em medidas de roteadores de *backbone* reais, assim como os trabalhos de [16] e [11], instalados em um ambiente de laboratório de uma empresa provedora de serviços de telecomunicações, combina as medidas de consumo coletadas com as contas de energia do laboratório, utiliza um gerador de tráfego certificado para estressar a rede e os roteadores e analisa o impacto deste tráfego gerado, diferenciando este tráfego em protocolos de transporte e de aplicação, identifica pontos da rede em que há consumo desnecessário de energia em função do pouco volume de tráfego, realiza o desligamento das placas energizadas sem necessidade, calcula o quanto este desligamento de placa pode resultar de economia real no consumo mensal do laboratório e apresenta um modelo de serviço consciente energeticamente, que pode ser oferecido para clientes empresariais que possuem horário de expediente fixo, o que gera um desperdício durante o período em que a empresa está fechada.

No próximo Capítulo serão apresentadas as características do laboratório utilizado como estudo de caso nesta dissertação, quais equipamentos existem neste laboratório, assim como sua logística de funcionamento e o levantamento de três anos do gasto mensal de energia do laboratório.

# Capítulo 3

## Cenário de Experimentação

O cenário utilizado para realização desta dissertação foi o laboratório de uma empresa provedora de serviços de telecomunicações, onde são realizados testes de homologação de equipamentos, testes de compatibilidade, testes de versionamento, homologação de novos serviços e novas características funcionais (frequentemente chamadas de *features*) dos equipamentos. São realizados entre outros testes que se façam necessário em um ambiente fora do ambiente operacional da empresa, sem oferecer riscos de impactar o cliente final devido à alguma alteração de parâmetro ou de configuração. Sendo assim, dentro da estrutura do laboratório existem diversas plataformas de telecomunicações disponíveis para as equipes de engenharia da empresa realizarem seus testes. Entre estas plataformas, podem-se identificar três áreas distintas: telefonia, transmissão e dados.

Os equipamentos que fazem parte da área de transmissão são utilizados para os testes onde existem grandes percursos a serem percorridos pela informação desejada, por exemplo os enlaces ligando grandes metrópoles como Rio de Janeiro e São Paulo, que não podem ser ligados diretamente entre dois roteadores e precisam de equipamentos específicos para envio e recebimento dos dados. Entre os equipamentos e as redes presentes no laboratório pode-se citar a rede OTN (*Optical Transport Networking*) e DWDM (*Dense Wavelength Division Multiplexing*). Os sistemas DWDM surgiram para otimizar o uso das fibras ópticas, aumentando a capacidade de transmissão agregando canais distintos (comprimentos de onda) dentro de uma única fibra óptica. Sistemas OTN funcionam da mesma forma, porém possuem uma facilidade maior para os protocolos de comunicação, pois são capazes de multiplexar diferentes *payloads* com fontes e bandas distintas. Normalmente são feitos testes para validação das taxas de transmissão dos enlaces de fibra óptica, se existe algum vazamento entre os canais ópticos e testes de novas versões e recursos da plataforma de gerência destas plataformas.

Na área de telefonia, existem diversas redes, tanto voltadas para o acesso do cliente final, como a rede HFC (*hybrid fiber-coaxial*), comumente presente nas ca-

sas dos brasileiros, e também as redes e equipamentos mais comuns nas operadoras como a rede NGN (*Next Generation Network*), a rede IMS (*IP Multimedia Subsystem*). As redes de telefonia NGN foram implementadas na empresa em 2004, com a intenção de convergir as redes de telefonia e dados em um único meio de transporte, uma função até então não existente quando as redes de telefonia utilizavam as centrais TDM (*Time Division Multiplexing*). Já a rede IMS surgiu como uma evolução das redes NGN, uma quantidade reduzida de equipamentos desempenham as funções de autenticação, controle de sessão, controle de recursos de mídias, entre outras soluções de VoIP (*Voice over Internet Protocol*). Há ainda os equipamentos de segurança que fazem a intermediação entre a rede de telefonia e a rede *backbone*, como o SBC (*Session Border Controller*), a principal função de um SBC nas redes de telefonia é de realizar uma proteção entre a rede de acesso e o núcleo da rede, prevenindo ataques maliciosos e podendo inserir criptografia de sinalização se desejado. Predominantemente, os SBCs são inseridos nas redes que utilizam sinalização SIP (*Session Initiation Protocol*), escondendo a topologia da rede do provedor de serviços.

Assim como as outras áreas, a área de dados possui tanto equipamentos novos para serem testados e homologados antes de entrar na rede *backbone* ativa da empresa, como também roteadores de grande porte mais antigos que já entraram em obsolescência. Estes são mantidos para caso haja algum problema de incompatibilidade ou testes de novas versões de *software*, para testes de carga através de um gerador de tráfego e testes de novas configurações e serviços. Por decisões estratégicas que foram tomadas ao longo do tempo, a rede *backbone* da empresa é composta por roteadores de um único fabricante, de certa forma isso garante uma facilidade para manutenção e suporte da rede com o fornecedor, por outro lado, a concentração de um único fabricante no núcleo da rede reduz o poder de barganha da empresa com o fornecedor. Esta decisão veio sendo questionada com o tempo, e em 2016 já começaram testes de homologação com outros fornecedores de roteadores de grande porte para verificação de suas capacidades em atender a demanda da empresa. Entretanto, estes roteadores até o momento da realização desta dissertação ainda não foram integrados definitivamente na rede *backbone* tanto de produção, quanto do laboratório. Dessa forma, toda a análise feita nesta dissertação foi em cima de equipamentos de um mesmo fornecedor, contemplando 26 roteadores instalados em 10 racks, estes 26 roteadores são distribuídos entre 8 modelos diferentes.

O laboratório é certificado pela norma ABNT ISO/IEC 17025 [19] o que garante uma qualificação internacional para os ensaios realizados. Um dos requisitos da norma é o sistema de gestão que garante que cada teste possua um identificador único chamado de Agendamento de Serviço (AS). Este agendamento identifica o Solicitante do teste, o Responsável Técnico e o Responsável da Área Técnica do

teste. Um dos requisitos da norma é garantir a rastreabilidade de cada equipamento, através do número da AS, possibilitando reservar os equipamentos desejados para cada teste. Para o funcionamento de toda a estrutura do laboratório, há um quadro de aproximadamente 30 funcionários fixos, entre equipe de responsáveis técnicos, funcionários de limpeza, segurança e logística e gerência. Em alguns casos esse número pode chegar até 50 em ocasiões de treinamento de pessoal, testes com funcionários de fornecedores, equipes de engenharia, equipes de instalação e outros funcionários temporários e/ou terceirizados.

Uma das motivações que fomentou esta dissertação foi a percepção do aumento brusco na conta paga à empresa fornecedora de energia elétrica, uma vez que o valor da conta ultrapassou a faixa de R\$ 100.000,00, logo no primeiro trimestre de 2015, quando houve o ajuste na tarifação da energia elétrica [20, 21]. Apesar de toda a estrutura necessária para manter o laboratório operacional, contando com refrigeração, iluminação e alimentação dos equipamentos, o valor da conta mensal de energia nunca havia chegado próximo a este valor e o edifício do laboratório não conta com elevador, o que poderia elevar o custo da energia elétrica.

A partir deste período, começou-se a realizar o acompanhamento mensal do valor pago à concessionária de energia elétrica e a avaliação da energia consumida pelo laboratório. Foi realizado o levantamento das contas de energia desde dezembro de 2013. A partir deste levantamento, gerou-se o gráfico mostrado na Figura 3.1. Os valores representam o gasto total com energia do laboratório, tanto com equipamentos de telecomunicações, quanto com iluminação, climatização e os demais consumos para manter o prédio operacional. Conforme será mostrado no final deste trabalho, a rede *backbone* do laboratório representou mais de 20% do valor pago pelo laboratório à concessionária de energia elétrica entre dezembro de 2016 e janeiro de 2017.

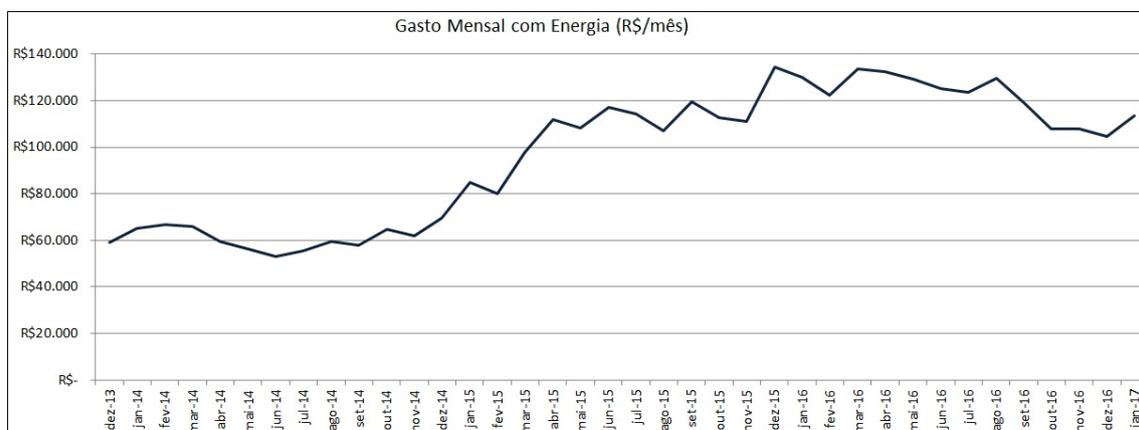


Figura 3.1: Gasto mensal com energia.

Entre dezembro de 2013 até dezembro de 2014, o custo mensal da energia

elétrica, não ultrapassou em nenhum momento a faixa de R\$ 70.000,00. Porém, em janeiro de 2015 houve um aumento de 22%. Já no primeiro trimestre de 2016 o valor mais do que dobrou quando comparado ao primeiro trimestre de 2014. Cabe observar que não houve nenhuma inserção de elementos novos na rede do laboratório entre outubro de 2015 até outubro de 2016.

Para realizar uma avaliação precisa e entender o porquê deste aumento no final de cada mês, avaliou-se também o consumo do laboratório informado pela concessionária de energia em cada mês e o valor das tarifas cobradas pela empresa. As tarifas homologadas pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) aplicáveis ao faturamento mensal de energia elétrica dos consumidores cativos são compostas pelos valores relativos à Tarifa de Energia elétrica (TE) e à Tarifa de Uso dos Sistemas de Distribuição (TUSD). As tarifas de energia elétrica são referentes aos contratos de compra de energia celebrados entre consumidores e a concessionária de serviço público de distribuição e à parcela correspondente à energia elétrica da tarifa de fornecimento dos consumidores. As tarifas de uso dos sistemas de distribuição de energia elétrica são tarifas estabelecidas pela ANEEL, destinadas ao pagamento pelo uso do sistema de distribuição em determinado ponto de conexão ao sistema. Dessa forma, as tarifas cobradas pelas concessionárias de energia elétrica são divididas em quatro tarifas: “Consumo Ponta TE”, “Consumo Fora Ponta TE”, “Consumo Ponta TUSD” e “Consumo Fora Ponta TUSD”. O horário de ponta para o consumo de energia é o período do dia de maior utilização de rede elétrica, o que corresponde ao período entre 17h30 e 20h30, com exceção de sábados, domingos e feriados nacionais.

Com base nos dados das contas de energia anteriores foi feita a análise mostrada na Figura 3.2. Neste gráfico é mostrado o consumo do laboratório em cada categoria cobrada pela concessionária de energia. A intenção com este levantamento foi de verificar se o consumo do laboratório cresceu da mesma forma como o gasto mensal, o que justificaria o aumento no valor cobrado.

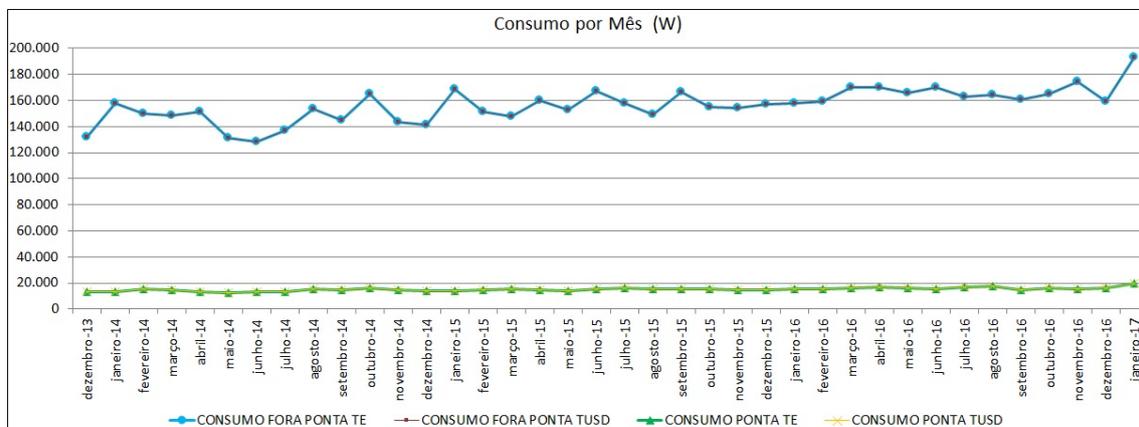


Figura 3.2: Consumo mensal com energia do laboratório.

Analisando o gráfico da Figura 3.1, no ano de 2014 a média da conta paga à concessionária ficou pouco acima de R\$ 60.000,00 e quando comparado com o ano de 2016, a média mais que dobrou. Analisando o gráfico da Figura 3.2 pode-se observar que embora tenha havido um crescimento do consumo neste período de três anos, a ordem de grandeza não foi a mesma do valor pago à concessionária de energia.

Em seguida, foi feita a análise da tarifa unitária para cada uma das categorias cobradas pela concessionária durante o mesmo período, como pode ser visto na Figura 3.3. Observa-se claramente o efeito dos reajustes da tarifa com o passar dos anos, principalmente no valor da tarifa de energia elétrica (TE) nos dois horários fora e dentro de ponta.

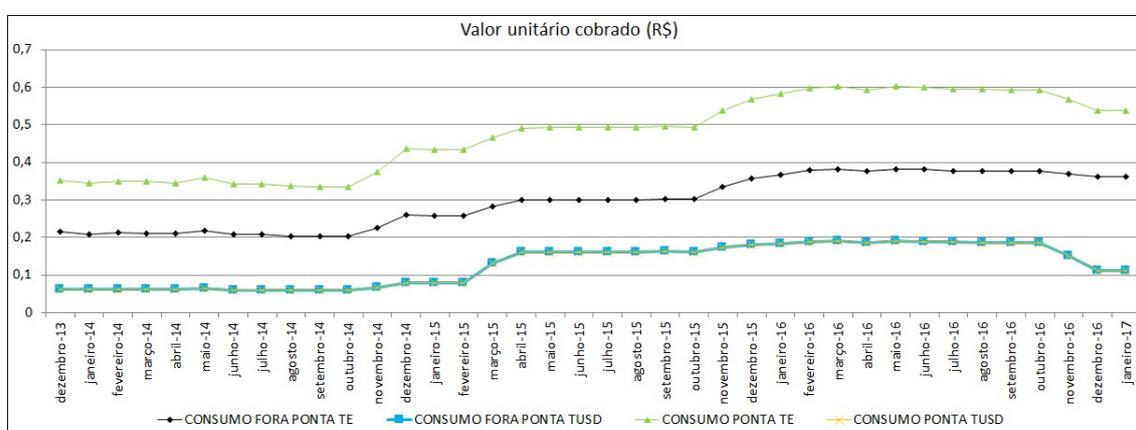


Figura 3.3: Valor unitário cobrado pela empresa distribuidora de energia.

Com estes três gráficos pode-se concluir que o aumento no valor da conta de energia se deu por uma combinação entre o aumento do consumo de energia do laboratório, mesmo que numa escala menor (aumento de 13% entre a média de 2014 e 2016), com o aumento no valor tarifário (aumento de 60% entre a média de 2014 e 2016) por parte da concessionária de energia elétrica. Essa combinação fez com que em um período de três anos a média do valor pago pela energia dobrasse, como observado entre os anos de 2014 e 2016.

Após outubro de 2016, percebe-se uma queda nas tarifas de energia cobradas. Um dos frutos deste trabalho de análise foi a renegociação do contrato de prestação de serviço da concessionária de energia com o laboratório. No final de setembro de 2016, alterou-se a demanda contratada de ponta de 255 kW para 300 kW e a demanda fora de ponta de 290 kW para 330 kW. O efeito disso foi a diminuição do valor cobrado a partir de outubro de 2016. Essa alteração diminuiu o valor cobrado pois o laboratório estava constantemente pagando por ultrapassar a demanda contratada e pagar o excedente desta demanda.

Em virtude da redução da conta de energia com a renegociação do contrato de

energia do laboratório, foi feita uma análise mais profunda nos elementos consumidores de energia do laboratório, estudando pontos onde seria possível gerar uma redução do consumo de energia em função de alguma configuração ou de desligamento de equipamentos em horários de baixa utilização da rede do laboratório.

No próximo Capítulo, será mostrada a metodologia utilizada para a coleta de dados dos roteadores, a política de rotina aplicada no *script* desenvolvido para a coleta dos dados de consumo de cada roteador da rede *backbone* e os tipos de pacotes gerados para estressar a rede *backbone*. Também será mostrado a topologia da rede *backbone* em questão e os dois fluxos de tráfego gerados através do gerador de tráfego para análise do consumo dos roteadores.

## Capítulo 4

# Análise do Consumo Energético

Conforme mostrado no capítulo anterior, o cenário de consumo de energia do laboratório apresenta uma enorme oportunidade de estudo e análise do consumo de energia de diversos equipamentos de telecomunicações. Neste trabalho, o objeto de estudo foi a rede *backbone* do laboratório. Uma das intenções deste trabalho é entender como o consumo dos roteadores se comporta quando há inserção de tráfego na rede, se há aumento no consumo em função do tráfego, qual a relação entre consumo e tráfego, se tráfegos de diferentes tipos de protocolos e propriedades geram alguma alteração no consumo do roteador. Nossos resultados mostram que sim, há um aumento no consumo dos roteadores em função do tráfego e que não há grande distinção entre os diferentes protocolos de transporte ou aplicação do ponto de vista do consumo energético do roteador. Será feito também uma outra abordagem para estudar o consumo dos roteadores. Será identificado alguns pontos da rede onde existam oportunidades de desligamento ou desativação de funções ou de nós, sem que haja qualquer alteração no desempenho da rede, não comprometendo suas funcionalidades e serviços.

Para entender melhor o consumo energético de uma rede *backbone*, foram usados elementos reais instalados no ambiente de laboratório, equipados com as mesmas placas que estão na planta ativa da rede. Como dito anteriormente, a rede do laboratório foi desenhada para ser a mais fidedigna possível com o ambiente de produção da empresa, a fim de possibilitar a realização de testes de novos serviços, testes de novos *releases* de *software*, testes de compatibilidade com novos equipamentos para incorporação na planta ativa, treinamentos e atividades que precisem ser realizada em um ambiente que não afetem os clientes.

A topologia da rede, assim como a capacidade dos enlaces e os modelos dos roteadores utilizados estão mostrados na Figura 4.1. Como é comum em uma rede de grandes proporções, não há uma topologia geral previamente definida e sim algumas topologias características em alguns pontos da rede. Por exemplo, pode-se observar o núcleo da rede em malha *full-mesh* (Área 0 na figura), enquanto nas bordas

existem duas redes em estrela (Áreas 1 e 2) formando uma redundância de enlace para cada elemento. Também é possível observar onde as redes de acesso localizadas atrás do SBC e CMTS (*Cable Modem Termination System*) se inserem na topologia da rede *backbone*. Estas redes trafegam dados através do *backbone* para entregar seus serviços ao usuário final, dentro do ambiente do laboratório. A maioria das redes presentes proveem serviços de telefonia para realização de testes por exemplo com PABX, novos terminais telefônicos, novos protocolos de telefonia, serviços baseados em SIP (*Session Initiation Protocol*), etc. Outra rede de acesso que trafega pelo *backbone* é a rede *Hybrid Fiber Coax* (HFC) muito comum nas residências do Brasil, onde há a presença de *cable modems* que se comunicam com o CMTS. Também é possível observar o UMG (*Universal Media Gateway*) que tem a função de tradução de diferentes fluxos de mídia de tecnologias diferentes, permitindo que estas comunicações multimídia possam trafegar em uma rede de dados através do protocolo IP. As leituras de consumo de elementos apresentadas nesta dissertação não contemplam os elementos que compõem cada uma destas redes, o foco foi especificamente os elementos da rede *backbone*. Todos os roteadores analisados neste trabalho são do mesmo fabricante, Cisco. Porém existem diversas linhas de modelos diferentes que compõem a rede, desde equipamentos mais antigos como a linha *GSR12000* [22], *7200 VXR Series Router* [23] e *7609-S Router* [24], o núcleo todo composto pelos modelos *Carrier Routing System* (CRS) [25]- [26], até as linhas mais novas: *Aggregation Services Router* (ASR) 1000 [27] e 9000 [28].

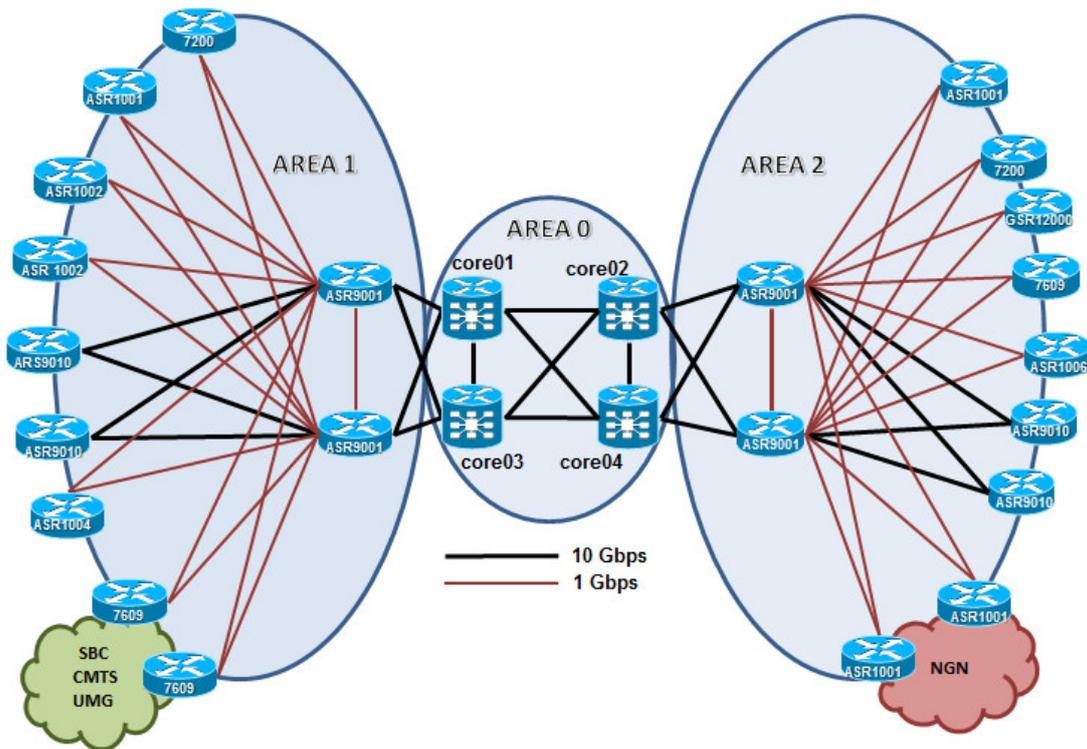


Figura 4.1: Topologia da rede de *backbone* estudada.

Na Tabela 4.1 é feito um inventário da rede *backbone*, listando a quantidade de portas de 100 Mbps, 1 Gbps e 10 Gbps por roteador, assim como a versão do sistema operacional, modelo do roteador e *hostname*. Pode-se observar na tabela que a rede possui tanto roteadores mais modernos, com várias portas de 10 Gbps, quanto roteadores ainda com portas de 100 Mbps. Todos estes roteadores são testados para garantir que haja interoperabilidade entre eles. Os modelos ASR9001 possuem dois *slots* para inserção de placas, nos modelos do laboratório todos possuem uma placa “A9K-MPA-20X1GE”, as outras quatro portas de 10 Gbps são do próprio chassis, este modelo ocupa 2 unidades de *rack*. Os modelos 7609-S possuem 9 *line cards* cada, e ocupam 21 unidades de *rack*. O roteador GACC02, modelo GSR 12410, possui 10 *line cards* em seu chassis, já os modelos ASR9010 possuem 8 *line cards* e ocupam 21 unidades de *rack*. Alguns modelos presentes na rede são menores como os da linha ASR1000 ocupando apenas 2 unidades de *rack*. Alguns modelos mais antigos já tiveram o “*End-of-life*” e “*End-of-sales*” anunciados: GSR 12000 e 7200.

Tabela 4.1: Inventario dos roteadores do *backbone*.

Hostname	Modelo	IOS	Fast Ethernet	Gigabit Ethernet	TenGigabit Ethernet
UDIST03	Cisco ASR 9001	5.2.4	0	20	4
UDIST04	Cisco ASR 9001	5.2.4	0	20	4
UDIST05	Cisco ASR 9001	5.2.4	0	20	4
UDIST06	Cisco ASR 9001	5.2.4	0	20	4
TCORE04	Cisco CRS-8	4.1.2	0	10	21
TCORE02	Cisco CRS-8	4.1.2	0	5	10
TCORE03	Cisco CRS-1	4.3.1	0	0	5
TCORE01	Cisco CRS-1	4.3.1	0	10	18
GACC01	Cisco 7609-S	15.2	0	72	6
GACC02	Cisco GSR 12410	12.0	32	15	0
UACC01	Cisco ASR 9010	5.2.4	0	60	4
UACC02	Cisco ASR 9010	5.2.4	0	20	4
UACC03	Cisco ASR 9010	5.2.4	0	20	4
UACC04	Cisco ASR 9010	5.2.4	0	20	4
ISACC01	Cisco ASR 1001	15.3	0	9	0
ISACC02	Cisco ASR 1001	15.3	0	12	0
XACC01	Cisco 7609-S	12.2	0	124	6
XACC02	Cisco 7609-S	12.2	0	120	8
ACC01	Cisco ASR 1002	15.4	0	4	0
ACC02	Cisco 7200	15.1	3	3	0
VRR	Cisco ASR 1001	15.3	0	9	0
RR	Cisco ASR 1001	15.2	0	4	0
DNSSERVER	Cisco 7200	12.4	1	3	0
IACC01	Cisco ASR 1006	15.4	0	13	1
BRAS	Cisco ASR 1002	15.1	0	4	0
TT	Cisco ASR 1004	15.4	0	5	0

## 4.1 Coleta de Dados

A metodologia de coleta dos dados de consumo dos roteadores foi feita através de um servidor Linux presente na rede de gerência do *backbone*. Desse modo foi possível alcançar todos os roteadores através de uma rede local. Foi desenvolvido um *script* em *shell* para acessar todos os roteadores via *Telnet* ou *Secure Shell* (SSH), de acordo com o protocolo de acesso permitido para cada roteador da rede.

Este *script* era responsável pelo acesso em cada um dos 26 roteadores conforme mostrado na Figura 4.1 e na Tabela 4.1, execução do comando de leitura do consumo energético, transferência desta leitura para o servidor e inserção da informação de ano, mês, dia e hora da leitura. Para a continuidade dos testes, foi inserido no agendamento de tarefas do sistema operacional uma rotina para que esta coleta dos dados de consumo de energia fosse feito em intervalos de uma hora. Este tempo mostrou-se factível, pois durante os testes preliminares, não foram notadas variações no consumo que justificassem um intervalo menor de coleta. O tempo total para que o *script* acessasse todos os roteadores, transferisse os dados e renomeasse os arquivos com a data e o horário das coletas era em torno de 15 minutos. No começo da realização deste trabalho tentou-se utilizar uma ferramenta para coletar os dados de consumo dos roteadores via SNMP através de uma solução da Cisco chamada *Cisco Energy Management Suite* [29] que prometia coletar os dados de consumo dos roteadores e gerar gráficos e estatísticas destas leituras de forma dinâmica. Mas foram encontrados diversos problemas de incompatibilidade entre as versões de sistema operacionais homologadas para o ambiente de produção da empresa e as versões que o *software* solicitava para o total funcionamento da solução. Em 23 de fevereiro de 2018, a Cisco informou o *end-of-sale* desta solução, dando descontinuidade para este *software*, além de problemas de coletas corretas das leituras de consumo através das MIB's dos roteadores.

O período total de coleta de dados foi desde às 16:00h do dia 22 de dezembro de 2016, até às 18:00h do dia 19 de janeiro de 2017, totalizando 29 dias de coleta de dados, com 675 rodadas de leituras da rede, com um total de 17.550 leituras.

Por optar-se em não usar um servidor SNMP (*Simple Network Management Protocol*) para realizar as leituras, não foram encontrados problemas de incompatibilidade de MIB (*Management Information Base*) entre as versões de sistema operacional e/ou hardware. Em contrapartida, foi encontrado o desafio de lidar com o problema de padronização das leituras em uma única interface. Cada roteador e versão de sistema operacional tem sua forma de expressar as informações, principalmente de consumo de energia. Alguns modelos simplesmente informavam o consumo total do equipamento, enquanto outros roteadores informavam detalhadamente o consumo de cada placa conectada. Por exemplo, as linhas Cisco 7609 e ASR

9000 informam a corrente consumida, assim como os valores de tensão e de potência para cada placa. Enquanto a linha CRS informa somente a potência utilizada por cada fonte do roteador. Para solucionar este problema, foi desenvolvido um código em Python com a função de varrer os diversos arquivos das leituras de consumo dos roteadores, distribuídos nas diversas pastas que eram divididas em ano, mês, dia e hora. Embora não existisse uma uniformidade entre todos os dados de leitura dos roteadores, as informações de consumo de um mesmo roteador sempre estavam na mesma posição de texto, o que facilitou o desenvolvimento do código para varrer estes arquivos e exportar a informação de consumo dos roteadores para um arquivo separado por vírgula, facilitando sua análise gráfica e estatística.

## 4.2 Geração de Tráfego

Um dos pontos de estudo desta dissertação é o estudo do consumo dos roteadores em função do tráfego da rede. O objetivo é entender o comportamento do consumo dos roteadores a partir de um estímulo gerado, com uma carga de tráfego a mais e como isto pode afetar seu consumo e da rede toda. Para a geração de tráfego, foi utilizado um hardware específico e certificado do laboratório, o Ixia XG12 [30]. O chassis do Ixia XG12 assemelha-se ao de um roteador de grande porte. Ele possui 12 *slots* para inserção de placas e ocupa 11 unidades de *rack*. Na configuração adquirida pelo laboratório, existem duas placas com 12 portas de 1 Gbps de capacidade, uma placa de menor capacidade com 4 portas de 1 Gbps, duas placas com 2 portas 10 Gbps e uma última placa com 8 portas 10 Gbps, totalizando 6 placas instaladas, 28 portas de 1 Gbps e 12 portas com 10 Gbps. A capacidade de geração de tráfego deste equipamento é de 148 Gbps, conforme as placas adquiridas pelo laboratório, podendo gerar tráfego de diferentes tipos de aplicações e protocolos de transporte. Uma de suas utilizações comuns no laboratório é a geração de rotas de vizinhança nos roteadores que estão sendo homologados para análise de sua capacidade de roteamento, aumentando sua tabela de roteamento e avaliando seu desempenho. Também é comum a geração de algum tráfego específico para avaliação do encaminhamento destes pacotes na rede.

Durante o começo da coleta de dados não foi gerado nenhum tráfego adicional com o Ixia XG12, de modo a entender como é o consumo da rede em seu estado normal, sem que houvesse alguma inserção de tráfego além do habitual da rede. Este período totalizou mais de 16 dias de monitoração da rede a cada hora. Após este período inicial, começou-se a gerar tráfego na rede para avaliar o consumo dos roteadores, totalizando 13 dias de coleta de dados com geração de tráfego adicional. Esta diferença de duração entre o período com geração de tráfego e sem geração de tráfego deu-se em virtude da janela acordada com o laboratório para realização

deste teste levando-se em conta os outros testes que estavam sendo realizados no laboratório. Foram utilizadas quatro portas *10GigabitEthernet* do Ixia XG12 para inserção de tráfego na rede com a intenção de analisar o comportamento dos roteadores em relação ao consumo de energia.

Os pacotes foram gerados em dois fluxos distintos, sendo que os pacotes tinham como origem e destino as portas do gerador de tráfego. Cada uma das quatro portas usadas tinha endereços públicos de uma faixa disponível para testes no laboratório, garantindo uma identificação única nas tabelas de roteamento do *backbone*.

O primeiro cenário de geração de tráfego atravessava completamente a rede para alcançar seu endereço de destino. Como mostra a Figura 4.2, as portas 10Gbps do Ixia XG12 foram conectadas no roteadores “uacc02” e “uacc03”, ambos roteadores do mesmo modelo (ASR9010) e versão de sistema operacional (5.2.4). Estes nós foram escolhidos por serem os últimos modelos adquiridos pela empresa, substituindo os roteadores anteriores que estavam em obsolescência na rede. A análise desejada com a inserção deste tráfego é verificar se esta geração de tráfego é capaz de causar um aumento de consumo relevante na rede *backbone*, uma vez que como a Figura 4.2 ilustra, o tráfego gerado passa por pelo menos 6 roteadores e diferentes áreas do protocolo OSPF.

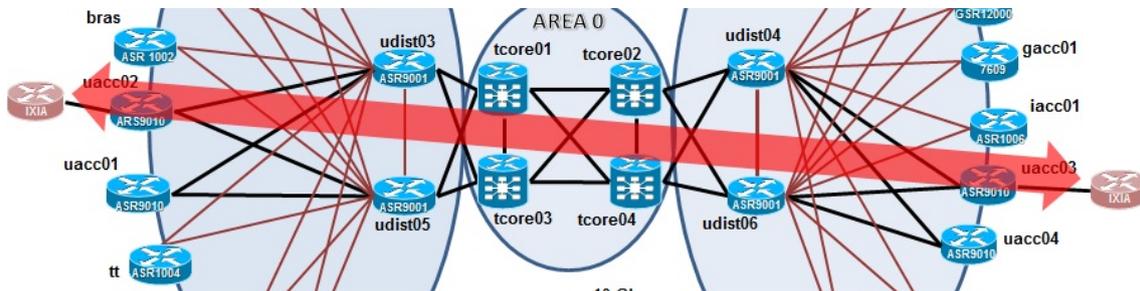


Figura 4.2: Cenário 1: tráfego gerado passando por toda a rede.

O segundo cenário de geração de tráfego foi através de um único roteador, de modo a estudar como seria o consumo de energia em um único roteador em função do tráfego passando através de seu barramento interno. Foi utilizado um terceiro roteador (“uacc04”) de mesmo modelo (ASR9010) e sistema operacional (5.2.4) dos roteadores do primeiro cenário, garantindo assim um mesmo limiar de comparação entre os dados coletados. A Figura 4.3 ilustra a topologia deste teste. Da mesma forma que no primeiro cenário, o gerador de tráfego Ixia XG12 foi conectado em duas portas de 10 Gbps do roteador, utilizando endereços públicos.

Todos os testes com geração de tráfego foram feitos para os dois fluxos mostrados nas Figuras 4.2 e 4.3 simultaneamente. Como as próprias figuras mostram, a geração de tráfego em um cenário de teste não influencia no outro, por se tratarem de nós diferentes e pelo próprio roteamento da rede garantir que o tráfego encaminhado nos

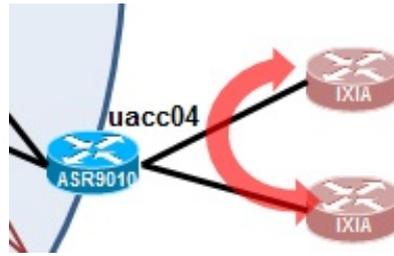


Figura 4.3: Cenário 2: avaliação de consumo em função do tráfego para um único elemento.

dois cenários não passassem pelo mesmo roteador. Isso fez com que todos os testes começassem e terminassem ao mesmo tempo, criando-se somente uma configuração de geração de tráfego no servidor de aplicação do Ixia XG12 para as quatro portas utilizadas. O modo de operação do gerador de tráfego é em função de sua capacidade da interface utilizada. Dessa forma, todos os fluxos gerados são uma porcentagem da capacidade máxima da interface *10GigabitEthernet*. Como cada interface do núcleo da rede possui 10 *Gbps* de capacidade, o limite máximo de geração de pacotes em todos os testes realizados foi de 90% da capacidade da interface, para garantir que o tráfego da Figura 4.2 não ocupasse totalmente os enlaces do núcleo da rede.

A geração de tráfego foi dividida em três experimentos. O primeiro teste foi uma geração de alta carga de pacotes, sem especificar algum protocolo de transporte ou de aplicação (*raw IP*), utilizando 90% da capacidade do enlace para geração de tráfego. Os pacotes tinham somente endereço de origem e destino, também foi mantido o valor padrão da MTU (*Maximum Transfer Unit*) da interface, de 1.510 Bytes. No segundo teste, foram geradas mensagens *HTTP Get* de modo a simular uma relação cliente-servidor. Em um primeiro momento com mensagens somente em um sentido e posteriormente com as requisições HTTP nos dois sentidos, como se existissem clientes e servidores nas duas pontas do teste. Alterou-se também a velocidade de geração de pacotes nos dois cenários. Foram gerados pacotes com 9, 11, 25, 50, 70 e 90 por cento da capacidade do enlace, para avaliar o consumo de energia dos roteadores em função do tráfego gerado, mantendo o valor padrão da MTU (1.510 Bytes). Por fim, foram geradas mensagens em protocolos de aplicação e de transporte distintos, com o valor de MTU da interface alterado para 9.208 B, com o intuito de verificar o compromisso entre uma quantidade menor de pacotes com uma quantidade maior de *bits* por pacote em função do consumo dos roteadores. Foram geradas mensagens *HTTP Get* e RTP (*Real-time Transport Protocol*), ambos com a MTU maior. A Tabela 4.2 traz o intervalo de duração de cada teste realizado, assim como o tipo de tráfego gerado e o valor da MTU da interface utilizada.

Tabela 4.2: Tabela de tráfego gerado.

De	Até	Intervalo	Tráfego gerado	MTU
22 de dez de 2016 16h	06 de jan de 2017 18h	16d 2h	-	-
06 de jan de 2017 19h	09 de jan de 2017 13h	3d 19h	90% line rate	1.518 B
09 de jan de 2017 18h	10 de jan de 2017 09h	15h	50% line rate HTTP Get Unidirecional	1.518 B
10 de jan de 2017 10h	10 de jan de 2017 17h	8h	9% line rate HTTP Get Unidirecional	1.518 B
10 de jan de 2017 18h	11 de jan de 2017 09h	16h	90% line rate HTTP Get Unidirecional	1.518 B
11 de jan de 2017 10h	11 de jan de 2017 17h	8h	11% line rate HTTP Get Unidirecional	1.518 B
11 de jan de 2017 18h	12 de jan de 2017 09h	16h	70% line rate HTTP Get Unidirecional	1.518 B
12 de jan de 2017 10h	12 de jan de 2017 18h	9h	25% line rate HTTP Get Unidirecional	1.518 B
12 de jan de 2017 19h	13 de jan de 2017 09h	15h	90% line rate HTTP Get Bidirecional	1.518 B
13 de jan de 2017 10h	13 de jan de 2017 18h	9h	70% line rate HTTP Get Bidirecional	1.518 B
13 de jan de 2017 19h	16 de jan de 2017 09h	2d 15h	50% line rate HTTP Get Bidirecional	1.518 B
16 de jan de 2017 10h	16 de jan de 2017 18h	9h	25% line rate HTTP Get Bidirecional	1.518 B
16 de jan de 2017 19h	17 de jan de 2017 10h	16h	11% line rate HTTP Get Bidirecional	1.518 B
17 de jan de 2017 11h	17 de jan de 2017 19h	9h	9% line rate HTTP Get Bidirecional	1.518 B
17 de jan de 2017 20h	18 de jan de 2017 09h	14h	90% line rate HTTP Get Bidirecional	9.208 B
18 de jan de 2017 10h	19 de jan de 2017 11h	1d 1h	90% line rate RTP	9.208 B

### 4.3 Desligamento de placas

Conforme visto pela revisão bibliográfica, diversos estudos mostraram que a forma mais eficaz para a redução do consumo de energia em roteadores é o desligamento dos nós ou de parte deles. Para realizar esta validação, estudou-se quais dos modelos de roteadores que compunham a rede seriam capazes de desligar parte de sua configuração e quais causariam maior redução no consumo geral da rede *backbone*, visto que nem todos os roteadores poderiam desligar placas sem comprometer o desempenho da rede, visto que alguns roteadores poderiam ficar isolados na rede *backbone* do laboratório e poderiam afetar outros testes que estavam sendo realizados. Para isto, foi feita uma análise com o consumo médio de cada modelo de roteador da rede *backbone* do laboratório. A Figura 4.4 mostra a média de consumo de cada modelo de roteador durante todo o período de análise e de coleta de dados. Conforme a Tabela 4.1 mostra, são 11 modelos de roteadores diferentes. Estes diferentes modelos são divididos entre 6 linhas de modelo. Os modelos com a maior média de consumo foram o 7609-S, CRS-1 e GSR 12410 respectivamente. Este resultado poderia ser previsto levando-se em conta que estes três modelos são linhas de roteadores mais antigas que os outros de mesma capacidade e características, como por exemplo os modelos ASR 9010, que apresentam um consumo médio bem menor. Os roteadores 7609-S possuem 9 *slots* para placas, chegando a ocupar 21 unidades de *rack*. Os modelos CRS-1 e GSR 12410 ocupam praticamente a mesma quantidade de unidades de *rack*, em contrapartida, os modelos CRS-1 possuem 4 *slots* para utilização de placas, enquanto o modelo GSR 12410 possui 10 *slots* para placas.

Com a Figura 4.4, foi possível identificar quais modelos de roteadores tem o maior consumo em média. Porém a distribuição da rede em relação aos modelos de roteadores não é uniforme, o que quer dizer que se analisarmos o consumo total da

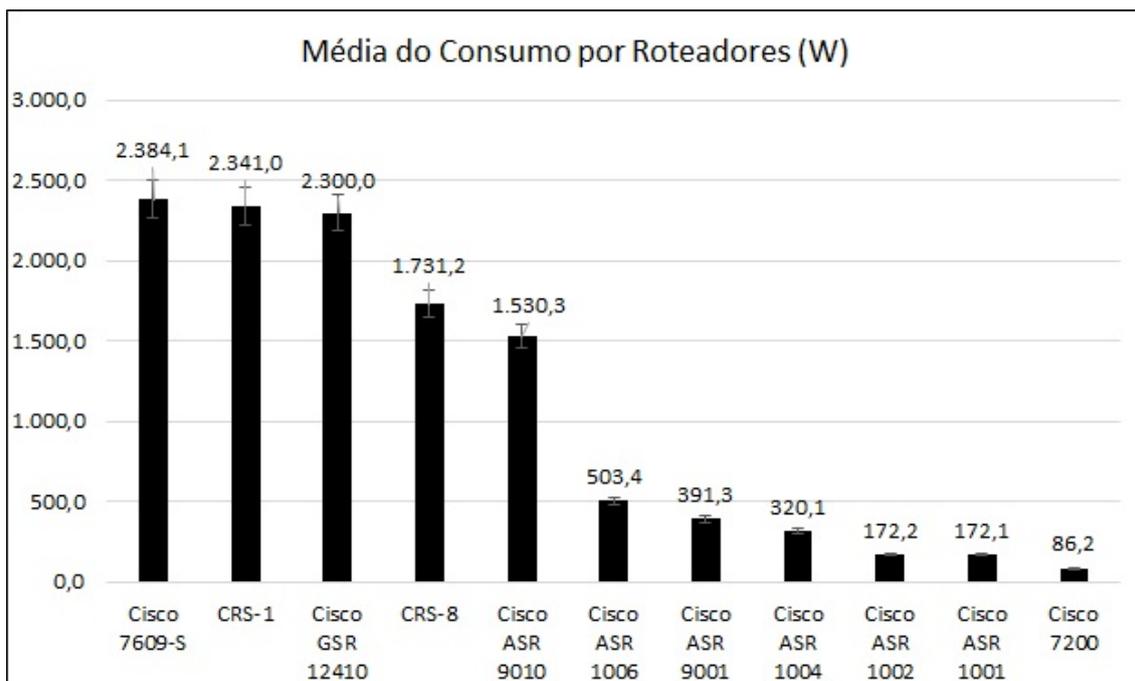


Figura 4.4: Média de consumo de cada modelo de roteador.

rede *backbone*, podemos chegar a conclusão de que determinado modelo de roteador embora apresente um consumo elevado, não possui grande representatividade no consumo total da rede em virtude da existência de poucos modelos semelhantes na rede.

Logo um estudo sobre a distribuição dos modelos de roteadores na rede *backbone* do laboratório tornou-se interessante para entender se os modelos que mais consomem energia possuem grande representatividade no consumo total da rede *backbone*. A Tabela 4.3 mostra a quantidade de roteadores por modelo na rede *backbone*. Entre os 26 roteadores que compõem a rede, os modelos ASR 9001, ASR 9010 e ASR 1001 são os que aparecem em maior quantidade.

Tabela 4.3: Modelos de roteadores que compõem a rede *backbone* do laboratório.

Modelo	Quantidade
Cisco ASR 9001	4
Cisco ASR 9010	4
Cisco ASR 1001	4
Cisco 7609-S	3
Cisco CRS-1	2
Cisco CRS-8	2
Cisco 7200	2
Cisco ASR 1002	2
Cisco GSR 12410	1
Cisco ASR 1006	1
Cisco ASR 1004	1

Com as duas análises feitas pela Figura 4.4 e pela Tabela 4.3, pode-se entender melhor como é o consumo da rede *backbone* e segmentar este consumo por modelo de roteador.

Levando em consideração a quantidade de cada modelo de roteador e a média de consumo de cada modelo, foi gerado o diagrama de Pareto mostrado na Figura 4.5, que analisa a média de consumo de cada modelo e a quantidade de cada modelo na configuração da rede. Nesta análise pode-se observar que para a configuração de rede estudada, três modelos de roteadores já representam 65,7% do total de consumo da rede. Outra análise interessante é de que o modelo GSR 12410 embora seja o roteador com a terceira maior média de consumo, possui a menor representatividade no total da rede por haver somente um modelo na rede e embora os modelos da linha ASR 1000 representem 8 dos 26 roteadores (31%), a média de seu consumo é menor quando comparada com outros modelos que possuem representatividade menor, uma vez que os roteadores da linha ASR 1000 são menores e não possuem *slots* para inserção de placas, o que é ruim do ponto de vista de redução do consumo de energia. Os cinco primeiros roteadores mostrados na Figura 4.5 são roteadores que possuem grandes quantidades de *slots* para inserção de placas. Esta observação é interessante pois mostra que estes modelos de roteadores são os que podem causar maior redução de energia com o desligamento destas placas em períodos de menor utilização da rede.

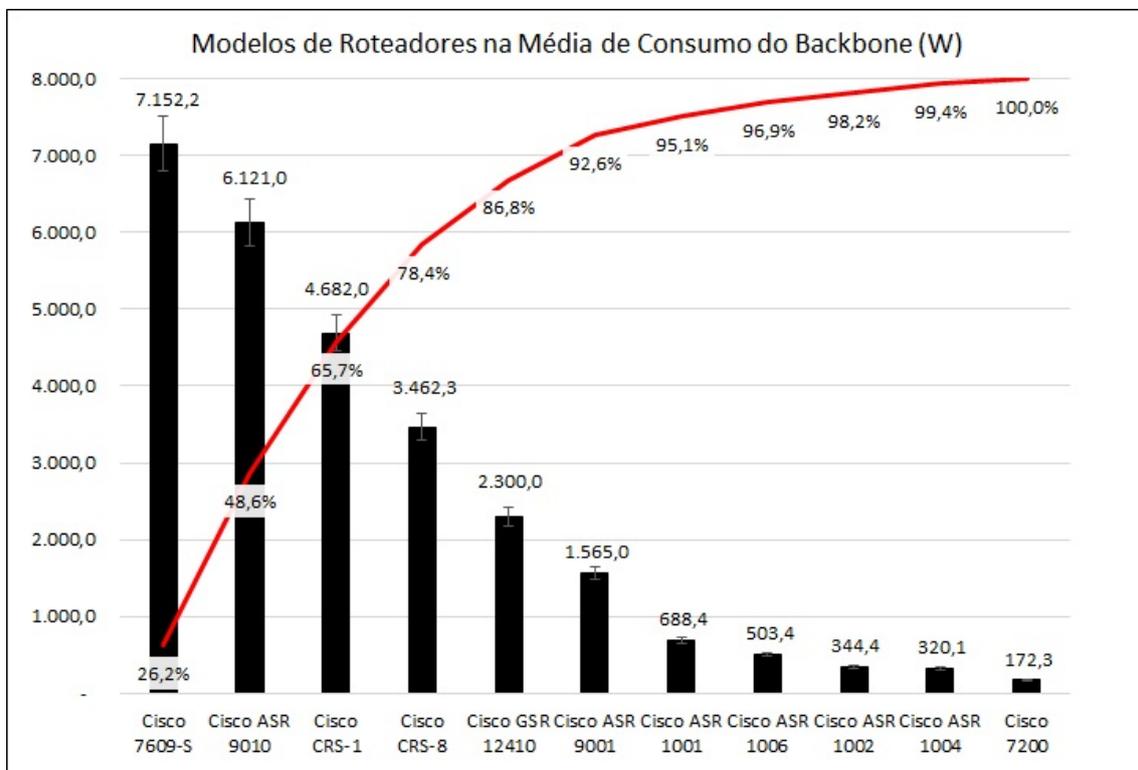


Figura 4.5: Consumo de cada modelo de roteador no total de consumo do *backbone*.

Com estas análises feitas, foram desligadas uma das nove placas, dos três roteadores do modelo 7609-S que conforme a análise mostrada na Figura 4.5 representa o maior ofensor de consumo da rede, totalizando assim, três placas desligadas. A intenção é analisar se realmente o consumo é reduzido de forma mais eficiente quando há o desligamento de parte do roteador. Um ponto importante de ressaltar é que estas placas foram escolhidas por não afetarem o funcionamento da rede e de nenhum outro teste em andamento no laboratório. As poucas portas com configuração nestas três placas foram migradas para outras portas de outras placas do mesmo roteador, garantindo que não houvesse perda de serviço para os testes realizados.

No Capítulo 5, serão mostrados os resultados do aumento do consumo dos roteadores em função do tráfego gerado pelo Ixia XG12 e o efeito do desligamento destas placas em cada roteador do modelo 7609-S.

# Capítulo 5

## Resultados Experimentais

Este capítulo tem como objetivo apresentar os resultados obtidos com as leituras dos roteadores durante os diferentes períodos de análise da rede conforme descrito no Capítulo 4. O consumo da rede é analisado em três situações diferentes: durante o período onde não houve inserção de tráfego adicional, durante a geração de tráfego para estressar os roteadores e após o desligamento das placas, conforme descrito nas Seções 4.2 e 4.3.

A rede *backbone* analisada, embora esteja instalada em um ambiente de laboratório, possui características semelhantes às de redes reais de provedores de serviços, tanto em sua capacidade de tráfego, como de modelos de roteadores e configuração da rede. Além disso, a rede do laboratório inclui os serviços que normalmente são oferecidos por uma empresa de telecomunicações, como as redes de acesso e serviços de telefonia.

Para lidar com todos os arquivos de leitura de consumo dos roteadores e conseguir computar os dados de cada leitura realizada durante os 28 dias de monitoração, foi desenvolvido um código em *Python* para criação de uma única base com todas as leituras realizadas e exportação destes dados para um arquivo no formato de valores separados por vírgula (CSV – *Comma Separated Values*). A consolidação desta base possuía as seguintes colunas: data e hora da leitura, *hostname*, modelo do roteador e consumo em *Watts* do roteador.

Nas Seções 5.1 e 5.2 serão apresentados os resultados das leituras de consumo energético dos roteadores durante o período analisado e nos três testes realizados.

### 5.1 Consumo com Geração de Tráfego

Conforme apresentado na Seção 4.2, um dos testes realizados foi a geração de um tráfego externo ao usual da rede na intenção de gerar um estímulo para dimensionar a relação entre tráfego-consumo dos roteadores.

Os gráficos mostrados nas Figuras 5.1 e 5.2 mostram a média de todas as leituras do consumo de energia dos roteadores conectados diretamente ao gerador de tráfego no primeiro cenário de teste conforme mostrado na Figura 4.2 durante os intervalos e parâmetros de geração de tráfego mostrados na Tabela 4.2. Todas as leituras foram coletadas com o código descrito na Seção 4.1 em intervalos de uma hora entre cada coleta.

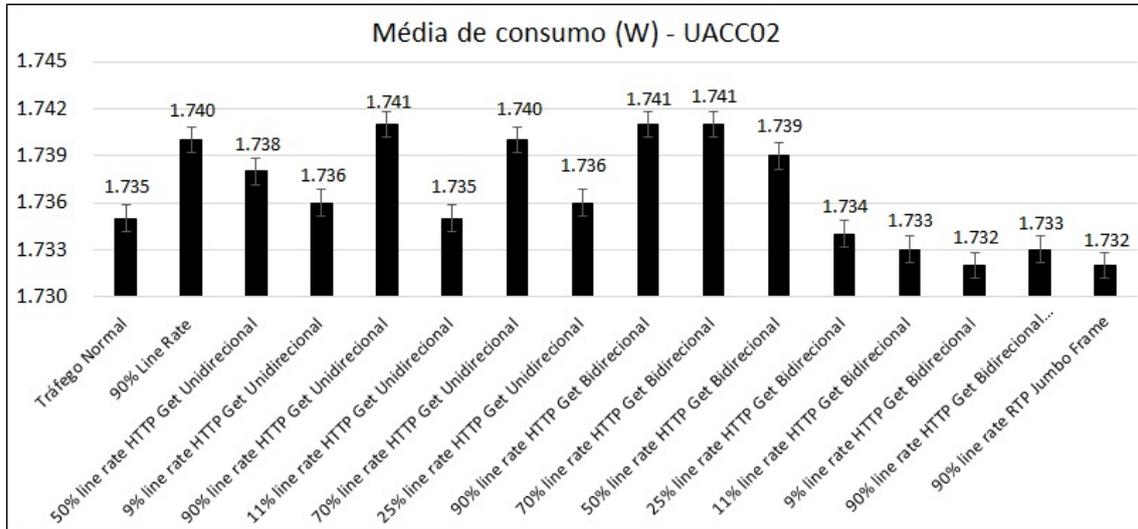


Figura 5.1: Média de consumo do UACC02.

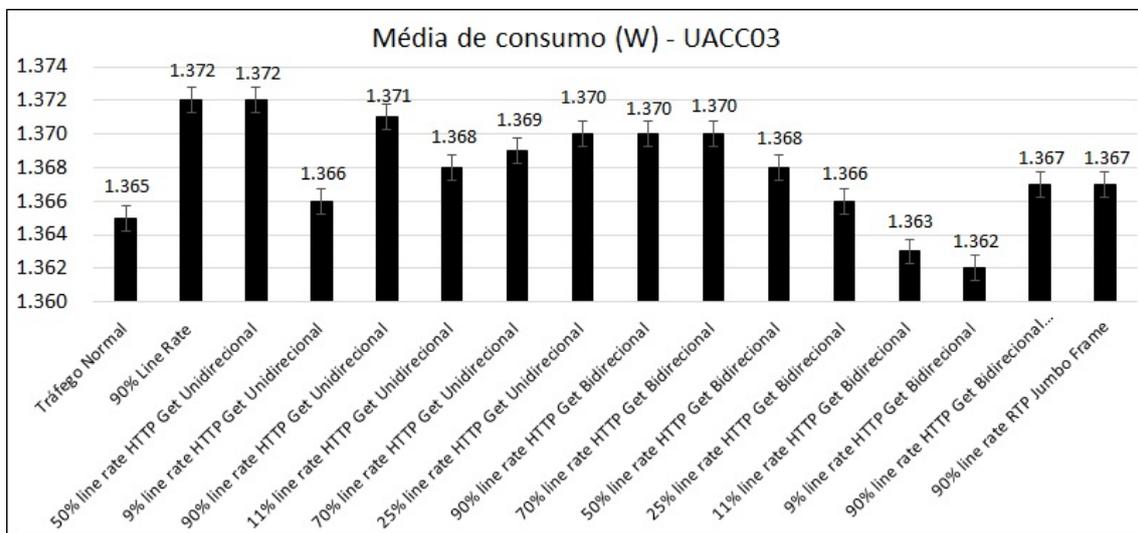


Figura 5.2: Média de consumo do roteador UACC03.

Após a coleta de dados foi observado que o consumo do roteador aumenta à medida que a quantidade de tráfego gerado também aumenta, porém este aumento é relativamente baixo em relação ao consumo total do roteador. No caso onde houve o maior aumento no consumo de energia, esse aumento não chegou a 1%, como observado no gráfico da Figura 5.2, quando a média do UACC03 atingiu o

valor de 1.372 W durante a geração de 9 Gbps de tráfego e comparado ao consumo de 1.365 W durante o período de tráfego normal na rede. A diferença do tráfego ser gerado em somente um sentido ou em um sentido bidirecional também não altera em grandes quantidades o consumo dos roteadores. No que seria o pior cenário para este teste, com geração também de 9 Gbps de tráfego, o consumo do UACC02 se manteve em 1.741 W tanto com as requisições HTTP unidirecionais quanto as bidirecionais. No caso do UACC03, houve apenas 1 W de variação a menos nas requisições bidirecionais. Outra constatação realizada é de que o consumo energético não sofreu grande alteração em função do protocolo de aplicação e de transporte do tráfego gerado. Nos dois casos nas Figuras 5.1 e 5.2 o tráfego de 9 Gbps com mensagens HTTP e RTP não resultaram em alteração significativa no consumo, somente no consumo do UACC02 houve uma variação de 1 W no consumo. Um resultado interessante fruto deste trabalho é que o consumo dos roteadores é menor quando o valor de MTU é maior, o que faz com que a quantidade total de pacotes que trafegam seja menor, o que de certa forma faz sentido com menos pesquisas na tabela de roteamento do roteador e decisões de encaminhamento de pacotes também. Esta observação pode ser feita tanto para o UACC02 quanto para o UACC03. No caso do UACC02, a média do tráfego com 90% de *line rate* de mensagens HTTP com *jumbo frame* foi de 1.733 W, quando para o mesmo tráfego com o valor de MTU menor, foi de 1.741 W, com uma redução de 0,4% no consumo. No mesmo exemplo, para o UACC03, houve uma redução de 3 W na média de consumo do tráfego gerado com as mensagens HTTP em *jumbo frame*.

Nos últimos testes, com geração de tráfego a 11% e 9% de *line rate* com mensagens HTTP Get bidirecionais, percebeu-se uma queda na média de consumo dos dois roteadores das Figuras 5.1 e 5.2, mesmo com a geração de tráfego adicional. O entendimento para este resultado inesperado foi de que houve uma queda no tráfego normal da rede e a combinação de uma geração de tráfego com taxas baixas, culminaram em uma média abaixo do usual da rede. Outro fator que também colaborou para este resultado foi o período de amostragem para estes dois testes serem menores do que o período sem inserção de tráfego, o que faz com que esta média seja mais suscetível a variações rápidas no consumo dos roteadores. Mesmo assim, no caso com maior variação, houve uma queda de 3 W quando comparado ao tráfego normal da rede, o que representa somente 2% no pior cenário que é o do UACC03 por possuir uma média de consumo menor.

A Figura 5.3 mostra o gráfico com as leituras de consumo obtidas do roteador UACC04 onde o gerador de tráfego foi conectado em duas portas da mesma placa do roteador conforme descrito na Seção 4.2 e mostrado na Figura 4.3, os intervalos de geração de tráfego e parâmetros do tráfego gerado também são os mesmos dos gráficos das Figuras 5.1 e 5.2 e seguem as descrições da Tabela 4.2.

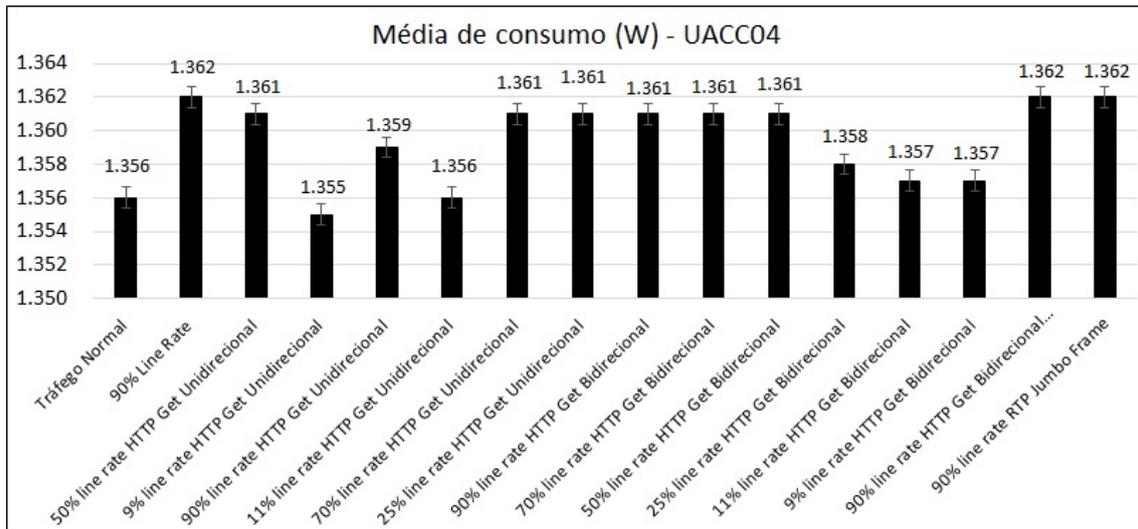


Figura 5.3: Média de consumo do roteador UACC04.

Assim como no consumo dos roteadores UACC02 e UACC03, o tráfego gerado aumentou o consumo do UACC04. Porém, o crescimento do consumo foi muito baixo, não chegando a 1 % para o caso de maior aumento no consumo, com a geração de tráfego bidirecional com *jumbo frame* à 90% de *line rate* chegando a média de 1.362 W, quando comparado ao consumo sem geração de tráfego externo de 1.356 W. Neste teste foi percebido que o aumento se manteve no caso da geração de tráfego bidirecional, o que faz sentido, uma vez que as portas do gerador de tráfego estão ligadas diretamente no roteador em questão. Também não foi percebida alteração no consumo em função do protocolo de transporte e de aplicação, a média de consumo se manteve em 1.362 W nos dois casos com geração de tráfego à 90% de *line rate* com *jumbo frame* e com protocolo HTTP e RTP. Por fim, não foi percebido redução na média de consumo do roteador quando houve geração de tráfego com o valor de MTU alterado para 9.208 Bytes, pelo contrário, quando comparado a duas últimas médias de consumo com as outras gerações de tráfego bidirecionais, houve um aumento de 1 W no consumo médio do roteador.

Nos testes realizados foi percebido que há o aumento do consumo na medida que o tráfego também aumenta, porém este aumento é muito pequeno, sendo quase que insignificativo quando comparado com o consumo total do roteador.

## 5.2 Consumo com Desligamento de Placas

Com base nos resultados dos testes da seção anterior, mostrou-se que uma política de escoamento de tráfego geraria uma economia no consumo da rede, porém seria uma economia muito pequena e quase imperceptível quando comparado com o consumo total da rede.

Conforme descrito na Seção 4.3, uma das medidas citadas como mais eficientes para a redução do consumo de energia é o desligamento de funções de rede, sejam eles um nó inteiro ou parte dele. Embora em um ambiente de laboratório, não foi possível realizar o desligamento total de qualquer um dos roteadores, porém foi possível estudar pontos da rede onde existia a possibilidade do desligamento parcial de funções de rede. Desta forma, foram desligadas três placas de três roteadores Cisco 7609-S presentes na rede em 12 de janeiro de 2017. Nestas placas não havia outros testes que necessitavam da execução especificamente nesta placa e haviam poucas portas de acesso conectadas. Estas poucas portas foram remanejadas para outras placas de roteadores, sem afetar os serviços que ali trafegavam.

A Figura 5.4 mostra a média de consumo dos três roteadores onde as placas foram desligadas.

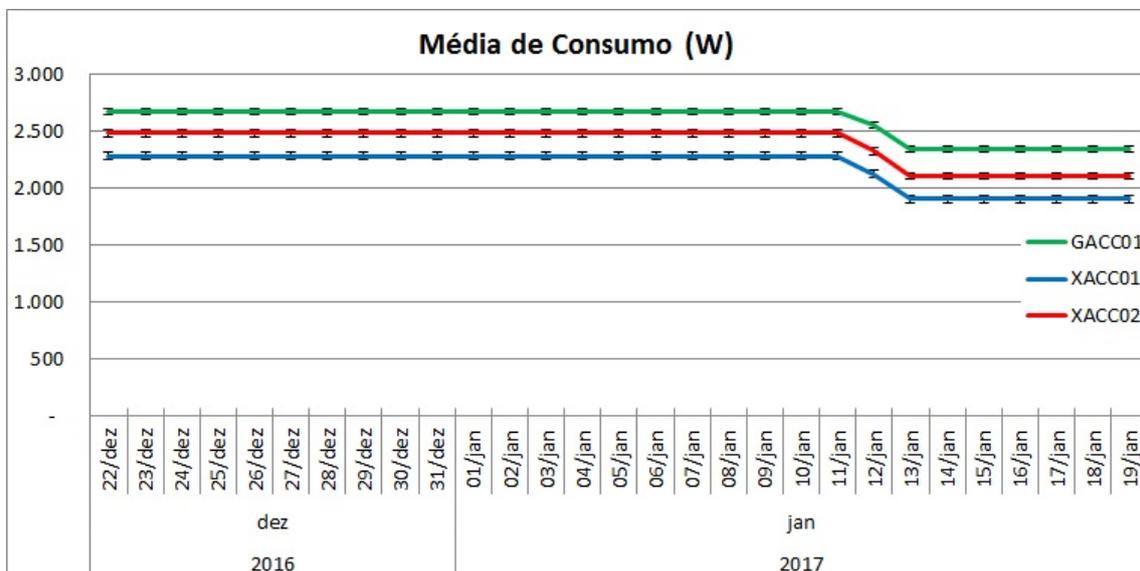


Figura 5.4: Média de consumo dos roteadores GACC01, XACC02 e XACC01.

O valor médio de consumo dos roteadores GACC01, XACC02 e XACC01 antes do desligamento das placas era de 2.673 W, 2.481 W e 2.278 W respectivamente. Após o desligamento das placas a média destes roteadores diminuiu para 2.336 W, 2.103 W e 1.901 W. Isso representa também uma redução de 12,6 %, 15,2 % e 16,6 % no consumo total destes roteadores respectivamente. Como o desligamento das placas foi realizado durante a tarde do dia 12 de janeiro, percebe-se uma pequena redução na média do consumo e então no dia 13 de janeiro há a média de consumo de um dia completo com as placas desligadas. O total de redução de consumo neste teste foi de 1.092 W com o desligamento das três placas. Embora estes roteadores sejam do mesmo modelo, eles possuem configurações de placas diferentes, por isso a diferença na média de consumo entre eles. A Tabela 5.1 mostra a configuração de placas dos três roteadores antes do desligamentos das placas para redução da

energia.

As placas desligadas dos roteadores XACC01 e XACC02 foram do modelo “WS-X6704-10GE”, ambas no *slot* 8 de cada roteador. A placa desligada do GACC01 foi a “76-ES+T+XC-20G” instalada no *slot* 2.

Tabela 5.1: Configurações de placas dos roteadores 7609-S.

Roteador	Line Card	Placa	Consumo (W)
XACC01	1	WS-X6748-GE-TX	325,5
	2	-	-
	3	7600-ES+2TG3CXL	296,52
	4	WS-X6748-GE-TX	325,5
	5	RSP720-3C-GE	310,38
	6	RSP720-3C-GE	310,38
	7	WS-X6724-SFP	125,16
	8	WS-X6704-10GE	377,16
	9	-	-
XACC02	1	WS-X6748-GE-TX	407,4
	2	-	-
	3	-	-
	4	WS-X6748-GE-TX	325,5
	5	RSP720-3CXL-GE	340,2
	6	RSP720-3CXL-GE	340,2
	7	WS-X6724-SFP	207,06
	8	WS-X6704-10GE	377,16
	9	-	-
GACC01	1	76-ES+T+XC-20G	337,26
	2	76-ES+T+XC-20G	337,26
	3	76-ES+XT-4TG3C	377,58
	4	-	-
	5	RSP720-3C-GE	310,38
	6	RSP720-3C-GE	310,38
	7	-	-
	8	WS-X6748-GE-TX	325,5
	9	-	-

Os dados de consumo apresentados na Tabela 5.1 não levam em consideração o consumo com as ventoinhas internas para refrigeração do chassis e as perdas internas de cada roteador, dessa forma, se somar-se o consumo das placas, o valor da soma será menor do que o apresentado no gráfico da Figura 5.4.

Os resultados obtidos com a redução do consumo após o desligamento parcial das funções de rede mostram claramente que a medida mais eficiente para redução do consumo energético é o desligamento de parte de funções da rede, sejam elas nós inteiros, ou parte deles. Idealmente este desligamento deve ser feito em período com pouca utilização da rede, ou de uma forma que não seja alterado o desempenho da rede após o desligamento parcial dos roteadores. No ambiente do laboratório

apresentado nesta dissertação, este processo poderia ser automatizado com o auxílio de um *script* semelhante ao que foi projetado para coleta dos dados. Pode-se facilmente alterar o *script* para que seja executado o comando de *shutdown* de placas “não vitais” para o funcionamento da rede entre os dias úteis e os finais de semana.

### 5.3 Consumo da Rede

A partir das leituras de consumo dos roteadores da rede *backbone* foi possível gerar um gráfico com a média de consumo energético dos 26 roteadores que compõem a rede *backbone*, para compreender o consumo da rede *backbone* e os efeitos dos testes gerados no consumo total da rede.

A Figura 5.5 mostra a média de consumo da rede em cada dia da análise deste trabalho. Conforme mostrado pela Tabela 4.2, entre os dias 22 de dezembro e 6 de janeiro, não houve qualquer inserção de tráfego adicional à rede. Constata-se que durante o período de geração de tráfego de 90% de *line rate*, entre 06 e 09 de janeiro, não houve acréscimo de consumo de energia na rede, assim como nos demais dias de geração de tráfego. A queda efetiva no consumo da rede foi após o dia 12 de janeiro, quando houve o desligamento das placas do roteadores, alcançando uma redução de 4,3% no consumo total da rede.

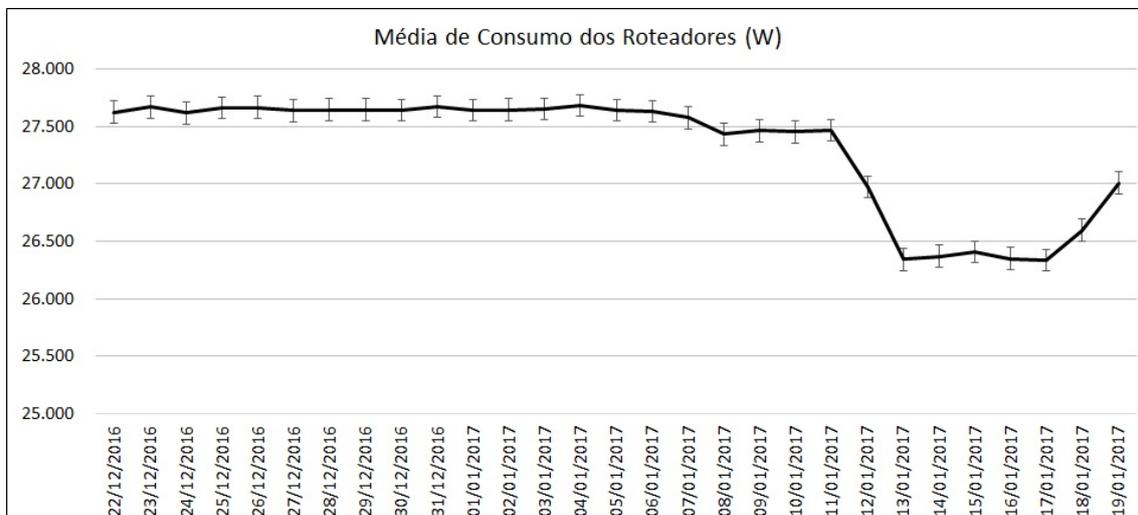


Figura 5.5: Média de consumo da rede *backbone*.

Esta base com os dados de consumo dos roteadores foi cruzada com os dados recolhidos das contas de energia elétrica do laboratório mostradas no Capítulo 3 para calcular o custo da rede *backbone* por hora. Conforme mostrado na Figura 5.6, foram considerados os valores tarifários das contas de dezembro de 2016 e janeiro de 2017. O gráfico apresenta uma curva bem semelhante à do gráfico da Figura 5.5. Percebe-se novamente uma queda no custo por hora da rede após o desligamento

das três placas em 12 de janeiro de 2017.

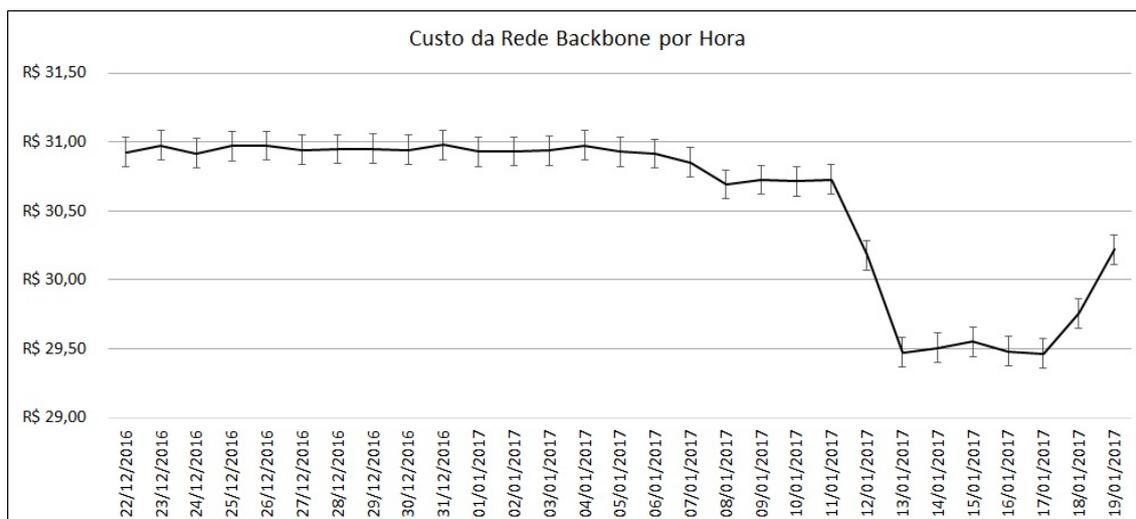


Figura 5.6: Custo da rede backbone por hora.

O valor médio do consumo da rede *backbone* até o dia 12 de janeiro foi de R\$ 30,86 por hora. No período entre 13 de janeiro até o dia 18, durante o qual houve o desligamento das placas, a média foi R\$ 29,54. Esta redução representa 4,3% de queda no consumo da rede *backbone*. Se estes valores forem calculados para a escala mensal (considerando um mês com 30 dias), o consumo da rede *backbone* sem o desligamento das placas é na média de R\$ 22.219,20 por mês. Mais especificamente, no período entre 13 a 18 de janeiro, onde houve o desligamento das três placas, o valor cobrado por mês foi de R\$ 21.268,05 somente para a rede *backbone*. Isso equivale a uma diferença de R\$ 950,40 de economia no final de um mês.

Levando-se em consideração o valor calculado para a rede *backbone* sem as três placas desligadas de R\$ 22.219,20 e o valor da conta de energia de dezembro de 2016 no valor total de R\$ 104.468,88. Estima-se que a rede *backbone* represente 21% do valor cobrado pela empresa concessionária de energia elétrica.

Para se ter uma ideia do consumo dos roteadores em função do seu modelo, e de quanto é o seu custo efetivo, a Tabela 5.2 mostra a média de consumo e o valor correspondente de cada roteador da rede *backbone* durante o período onde não houve inserção de tráfego na rede.

Conforme esperado, com base na Figura 4.4, os roteadores com menor custo são os modelos menores da linha ASR 1000 e 7200, com valores abaixo de R\$ 1 por hora. Os cinco roteadores com maiores custos para a empresa são TCORE01, GACC01, XACC02, GACC02 e XACC01 com valores de R\$ 3,14, R\$ 2,99, R\$ 2,78, R\$ 2,57 e R\$ 2,55 respectivamente, representando 45% do custo total da rede *backbone*. No caso do TCORE01 a explicação é que por ser um roteador do núcleo da rede, ele apresenta uma grande capacidade de tráfego, com 18 portas de 10 Gbps,

conforme mostrado na Tabela 4.1. Os outros quatro roteadores são de modelos mais antigos além de também possuírem grande capacidade de tráfego de dados, no caso dos modelos 7609-S e GSR 12410, possuem 9 e 10 *slots* para inserção de placas respectivamente.

Tabela 5.2: Consumo e custo dos roteadores no período sem inserção de tráfego.

Hostname	Modelo	Média de consumo (W)	Valor (R\$/h)
ACC01	Cisco ASR 1002	172,48	R\$ 0,19
ACC02	Cisco 7200	86,14	R\$ 0,10
BRAS	Cisco ASR 1002	171,97	R\$ 0,19
DNSSERVER	Cisco 7200	86,12	R\$ 0,10
GACC01	Cisco 7609-S	2.672,88	R\$ 2,99
GACC02	Cisco 12410	2.300,00	R\$ 2,57
IACC01	Cisco ASR 1006	503,39	R\$ 0,56
ISACC01	Cisco ASR 1001	172,20	R\$ 0,19
ISACC02	Cisco ASR 1001	172,15	R\$ 0,19
RR	Cisco ASR 1001	172,31	R\$ 0,19
TCORE01	CRS-1	2.802,00	R\$ 3,14
TCORE02	CRS-8	1.823,68	R\$ 2,04
TCORE03	CRS-1	1.880,00	R\$ 2,10
TCORE04	CRS-8	1.706,42	R\$ 1,91
TT	Cisco ASR 1004	319,89	R\$ 0,36
UACC01	Cisco ASR 9010	1.660,79	R\$ 1,86
UACC02	Cisco ASR 9010	1.734,46	R\$ 1,94
UACC03	Cisco ASR 9010	1.363,91	R\$ 1,53
UACC04	Cisco ASR 9010	1.355,13	R\$ 1,52
UDIST03	Cisco ASR 9001	380,00	R\$ 0,43
UDIST04	Cisco ASR 9001	380,00	R\$ 0,43
UDIST05	Cisco ASR 9001	425,00	R\$ 0,48
UDIST06	Cisco ASR 9001	380,00	R\$ 0,43
VRR	Cisco ASR 1001	171,98	R\$ 0,19
XACC01	Cisco 7609-S	2.278,08	R\$ 2,55
XACC02	Cisco 7609-S	2.480,52	R\$ 2,78

O capítulo seguinte resumirá as conclusões tiradas a partir dos testes realizados nesta dissertação, assim como análises de oportunidades e modelos de serviços conscientes do ponto de vista energético. Serão mostrados também pontos que podem ser tratados em trabalhos futuros e próximos passos deste trabalho.

# Capítulo 6

## Conclusões

Nesta dissertação foi estudado o consumo de energia de uma rede *backbone* real instalada em um ambiente de laboratório com plenas características de uma rede *backbone* em operação, incluindo a capacidade para prover serviços de rede reais. O que motivou inicialmente este estudo foi entender melhor como funciona o consumo da rede *backbone*, principalmente após os aumentos do valor pago à concessionária de energia ao final de cada mês. O levantamento realizado com o histórico das contas de energia elétrica comprovou que embora o laboratório tenha aumentado seu consumo de energia com o passar dos anos, o valor cobrado pela empresa com concessão de fornecimento de energia cresceu de forma mais acelerada e que a combinação destes dois fatores fizeram com que o custo de energia do laboratório dobrasse de valor em dois anos.

Conforme observado por Sansò *et al.* [7], a Internet em si gera um grande benefício para o meio ambiente e diminui o consumo de outras fontes de energia quando se pensa no “encurtamento” de distâncias que ela possibilita. Por exemplo, constantemente a Internet é usada para substituir viagens com queimas de combustíveis fósseis que as pessoas realizariam para se reunir caso ela não existisse. Contudo, a rede também pode ser parte do problema, com *data centers* demandando cada vez mais energia e refrigeração, conforme exemplificado pelo aumento do consumo de energia do laboratório com o passar dos anos. Além da capacidade de processamento cada vez maior dos equipamentos, o fato das redes de backbone serem superdimensionadas para que suportem o tráfego nos horários de pico da rede também pressiona o consumo energético, ao mesmo tempo em que gera uma enorme ociosidade de recursos entre os períodos de pico.

Há na literatura poucos estudos experimentais de longa duração que analisem o consumo de energia de equipamentos reais de redes *backbone*. Em muitos casos são usadas simulações para a avaliação do consumo dos roteadores. Assim, foram analisadas nesta dissertação leituras reais de roteadores que compõem uma rede *backbone*. Procurou-se entender na prática como o consumo de roteadores reais se

comporta em função da quantidade de tráfego.

No primeiro teste realizado, mostrou-se que o consumo dos roteadores aumenta muito pouco quando há um acréscimo no tráfego. A intenção com este teste era entender se alguma política de escoamento de tráfego seria eficiente para redução do consumo dos roteadores. Mostrou-se que há um aumento do consumo dos roteadores em função do tráfego de dados, mesmo que de ordem pequena. O resultado mais motivador, porém, é que existe uma maneira mais efetiva de gerar economia de energia, qual seja, através do desligamento de elementos de rede ou partes dos elementos, como placas de rede. Diferentes roteadores comerciais possuem esta funcionalidade. Neste segundo teste, foram encontrados pontos da rede que poderiam ser desligados sem que alterasse qualquer requisito de desempenho do serviço provido. O experimento conduzido com o desligamento de apenas três placas gerou uma economia efetiva de 4,3% de economia no consumo total da rede, o que mostra que esta abordagem pode ser expandida para outros nós em momentos de ociosidade.

Dessa forma, a rede poderia ser projetada para oferecer um novo modelo de serviço sustentável para clientes comerciais, por exemplo, pequenos clientes que possuem horário de funcionamento fixo e não utilizam a rede durante o período da noite e da madrugada. No teste realizado, a economia gerada com o desligamento de somente uma das três placas foi de R\$ 0,41 por hora com base nos dados de janeiro de 2017. Se neste modelo de serviço fosse decidido o desligamento das placas entre 20h da noite e 6h da manhã do dia seguinte, seriam 10h de economia por dia, em um mês com 30 dias, geraria uma economia de R\$ 123,00 por placa desligada. Isto, sem considerar que este modelo poderia contemplar um horário de desligamento maior durante finais de semana, aumentando ainda mais o valor economizado. Este modelo de serviço poderia gerar economia tanto para a empresa prestadora de serviço de telecomunicações quanto para a empresa cliente, uma vez que um serviço deste tipo poderia ser oferecido por um valor abaixo do mercado devido ao período sem acesso à rede. Dessa forma, o crescimento dos acessos à rede poderia ser ordenado de uma forma que não houvesse complexidade na hora do desligamento do acesso destes clientes, fazendo com que eles fossem alocados nas mesmas placas que serão desligadas após determinado horário, neste sentido não haveria nenhuma complexidade algorítmica para o desligamento de placas. Outra vantagem de um serviço focado no desligamento das placas dos roteadores é que o procedimento de “*on/off*” pode ser realizado com apenas um comando através de acesso remoto e pode ser programado para realização automática, de forma simples através de um *script* em um horário predeterminado.

O desligamento de um roteador causaria uma economia muito maior quando comparado ao desligamento de uma ou algumas placas, porém, no caso do desligamento de um roteador na prática, haveria a necessidade de uma intervenção local

para re-ligar o roteador. Mesmo que suas configurações permaneçam salvas em memória, os roteadores em sua maioria não possuem ainda a capacidade para se re-ligarem sem intervenção local e isso acabaria gerando custos para a empresa, o que inviabilizaria este modelo de serviço.

Uma consideração final sobre este possível modelo de serviço descrito é que ainda existe um certo receio em relação ao desligamento de equipamentos de rede *backbone* por parte das equipes de engenharia e operações das empresas. A insegurança se deve a incerteza de que quando as placas ou roteadores forem religados ou “acordados”, se eles voltarão em suas plenas capacidades e sem algum problema operacional.

Como próximos passos deste trabalho, pretende-se estender esta coleta de dados para diferentes fabricantes que possam vir a ser testados no laboratório para verificação do comportamento do consumo e comparação com a base coletada nesta dissertação. Este tipo de comparação pode ser determinante para decisões estratégicas de compra de um equipamento mais caro, porém que possui um consumo energético mais eficiente, o que pode trazer um retorno de investimento mais rápido com o passar do tempo. Pretende-se estudar como é o comportamento do consumo dos roteadores a medida que o valor de MTU é reduzido para valores abaixo do padrão de 1.518 Bytes, uma vez que isso geraria uma quantidade maior de procuras na tabela de roteamento dos roteadores. Por fim, estudar formas de automatização para o desligamento de quantidades maiores de placas de roteadores da rede *backbone* do laboratório em horários não úteis, como finais de semana e durante a madrugada, religando-os também de forma automática, sem que haja o comprometimento de funcionalidades de rede e/ou dos testes em execução.

# Referências Bibliográficas

- [1] “NASA Climate Change”. <https://climate.nasa.gov/>. Acessado em 09 de março de 2017.
- [2] SIGCOMM 2010. “First ACM SIGCOMM Workshop on Green Networking”. <http://conferences.sigcomm.org/sigcomm/2010/gncfp.php>, 2018. Acessado em 23 de janeiro de 2018.
- [3] CISCO SYSTEMS, INC. “Cisco Network Convergence System 6008 Single-Chassis System Data Sheet”. [https://www.cisco.com/c/en/us/products/collateral/routers/network-convergence-system-6000-series-routers/data\\_sheet\\_c78-728048.html](https://www.cisco.com/c/en/us/products/collateral/routers/network-convergence-system-6000-series-routers/data_sheet_c78-728048.html), 2018. Acessado em 25 de fevereiro de 2018.
- [4] CISCO SYSTEMS, INC. “Cisco Visual Networking Index”. [https://www.cisco.com/c/m/en\\_us/solutions/service-provider/vni-forecast-highlights.html](https://www.cisco.com/c/m/en_us/solutions/service-provider/vni-forecast-highlights.html), 2018. Acessado em 23 de janeiro de 2018.
- [5] BALIGA, J., AYRE, R., SORIN, W. V., et al. “Energy consumption in access networks”. In: *Optical Fiber communication/National Fiber Optic Engineers Conference, 2008. OFC/NFOEC 2008. Conference on*, pp. 1–3. IEEE, 2008.
- [6] BALIGA, J., HINTON, K., TUCKER, R. S. “Energy consumption of the Internet”. In: *Optical Internet, 2007 and the 2007 32nd Australian Conference on Optical Fibre Technology. COIN-ACOFT 2007. Joint International Conference on*, pp. 1–3. IEEE, 2007.
- [7] SANSÒ, B., MELLAH, H. “On reliability, performance and Internet power consumption”. In: *Design of Reliable Communication Networks, 2009. DRCN 2009. 7th International Workshop on*, pp. 259–264. IEEE, 2009.
- [8] CHRISTENSEN, K. J., GUNARATNE, C., NORDMAN, B., et al. “The next frontier for communications networks: power management”, *Computer Communications*, v. 27, n. 18, pp. 1758–1770, 2004.

- [9] MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. “Programa de Desenvolvimento da Geração Distribuída de Energia Elétrica”. <http://www.mme.gov.br/documents/10584/3013891/15.12.2015+Apresenta%C3%A7%C3%A3o+ProGD/bee12bc8-e635-42f2-b66c-fa5cb507fd06?version=1.0>, 2017. Acessado em 09 de novembro de 2017.
- [10] CISCO SYSTEMS, INC. “Cisco Power Calculator”. 2018. Acessado em 23 de janeiro de 2018.
- [11] VAN HEDDEGHEM, W., IDZIKOWSKI, F., LE ROUZIC, E., et al. “Evaluation of power rating of core network equipment in practical deployments”. In: *Online Conference on Green Communications (GreenCom), 2012 IEEE*, pp. 126–132. IEEE, 2012.
- [12] SHANG, Y., LI, D., XU, M. “Energy-aware routing in data center network”. In: *Proceedings of the first ACM SIGCOMM workshop on Green networking*, pp. 1–8. ACM, 2010.
- [13] FISHER, W., SUCHARA, M., REXFORD, J. “Greening backbone networks: reducing energy consumption by shutting off cables in bundled links”. In: *Proceedings of the first ACM SIGCOMM workshop on Green networking*, pp. 29–34. ACM, 2010.
- [14] EMBRATEL. “Centro de Referência Tecnológica da Embratel”. <http://portal.embratel.com.br/embratel/arquivos/apresentacao.pdf>. Acessado em 25 de fevereiro de 2018.
- [15] GUPTA, M., SINGH, S. “Greening of the Internet”. In: *Proceedings of the 2003 conference on Applications, technologies, architectures, and protocols for computer communications*, pp. 19–26. ACM, 2003.
- [16] CHABAREK, J., SOMMERS, J., BARFORD, P., et al. “Power awareness in network design and routing”. In: *INFOCOM 2008. The 27th Conference on Computer Communications. IEEE*, pp. 457–465. IEEE, 2008.
- [17] BIANZINO, A. P., CHAUDET, C., ROSSI, D., et al. “A survey of green networking research”, *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, v. 14, n. 1, pp. 3–20, 2012.
- [18] BIANZINO, A. P., CHAUDET, C., MORETTI, S., et al. “Enabling sleep mode in backbone IP-networks: a criticality-driven tradeoff”. In: *Communications (ICC), 2012 IEEE International Conference on*, pp. 5946–5950. IEEE, 2012.

- [19] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. “ABNT NBR ISO/IEC 17025 - Requisitos Gerais para Competência de Laboratórios de Ensaio e Calibração”. 2017.
- [20] G1. “Primeiros reajustes da conta de luz de 2015 ultrapassam os 40%”. <http://g1.globo.com/economia/seu-dinheiro/noticia/2015/02/primeiros-reajustes-da-conta-de-luz-de-2015-tem-altas-superiores-30.html>, . Acessado em 04 de fevereiro de 2018.
- [21] G1. “Alta da energia em 2015 pode superar 50%, mostram decisões da Aneel”. <http://g1.globo.com/economia/seu-dinheiro/noticia/2015/02/alta-da-energia-em-2015-pode-superar-50-revelam-decisoes-da-aneel.html>, . Acessado em 04 de fevereiro de 2018.
- [22] CISCO SYSTEMS, INC. “Cisco 12000 Series Routers”. <https://www.cisco.com/c/en/us/products/routers/12000-series-routers/index.html?dtid=ossdc000283>, 2018. Acessado em 16 de janeiro de 2018.
- [23] CISCO SYSTEMS, INC. “Cisco 7200 Series Routers”. <https://www.cisco.com/c/en/us/products/routers/7200-series-routers/index.html?dtid=ossdc000283>, 2018. Acessado em 16 de janeiro de 2018.
- [24] CISCO SYSTEMS, INC. “Cisco 7609-S Chassis”. [https://www.cisco.com/c/en/us/products/collateral/routers/7609-router/product\\_data\\_sheet0900aecd8057f3d2.html](https://www.cisco.com/c/en/us/products/collateral/routers/7609-router/product_data_sheet0900aecd8057f3d2.html), 2018. Acessado em 16 de janeiro de 2018.
- [25] CISCO SYSTEMS, INC. “Cisco CRS-1 4-Slot Single-Shelf System”. [https://www.cisco.com/c/en/us/products/collateral/routers/carrier-routing-system/product\\_data\\_sheet0900aecd804ff54e.html](https://www.cisco.com/c/en/us/products/collateral/routers/carrier-routing-system/product_data_sheet0900aecd804ff54e.html), 2018. Acessado em 16 de janeiro de 2018.
- [26] CISCO SYSTEMS, INC. “Cisco CRS 8-Slot Single-Shelf System Data Sheet”. [https://www.cisco.com/c/en/us/products/collateral/routers/carrier-routing-system/CRS-3\\_8-Slot\\_DS.html](https://www.cisco.com/c/en/us/products/collateral/routers/carrier-routing-system/CRS-3_8-Slot_DS.html), 2018. Acessado em 16 de janeiro de 2018.
- [27] CISCO SYSTEMS, INC. “Cisco ASR 1000 Series Aggregation Services Routers”. <https://www.cisco.com/c/en/us/products/routers/asr-1000-series-aggregation-services-routers/index.html?dtid=ossdc000283>, 2018. Acessado em 16 de janeiro de 2018.

- [28] CISCO SYSTEMS, INC. “Cisco ASR 9000 Series Aggregation Services Routers”. <https://www.cisco.com/c/en/us/products/routers/asr-9000-series-aggregation-services-routers/index.html>, 2018. Acessado em 16 de janeiro de 2018.
- [29] CISCO SYSTEMS, INC. “Energy Management Data Sheet”. <https://www.cisco.com/c/en/us/products/collateral/switches/energywise-discovery-service/data-sheet-c78-729774.html>, 2018. Acessado em 15 de janeiro de 2018.
- [30] KEYSIGHT TECHNOLOGIES. “Ixia XG12 Chassis”. <http://ixia.cabanday.com/products/xg12/index.html>. Acessado em 25 de novembro de 2017.