

**Sergio Roberto Villarreal**

**MODELO DE GERENCIAMENTO DA INFRAESTRUTURA DE  
REDE PARA OTIMIZAÇÃO DE NUVEM VERDE**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-graduação em Ciência da Computação da Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do Grau de Mestre em Ciência da Computação.

Orientador: Prof. Carlos Becker Westphall, Dr.

Florianópolis  
2014

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,  
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Villarreal, Sergio Roberto  
Modelo de Gerenciamento da Infraestrutura de Rede para  
Otimização de Nuvem Verde / Sergio Roberto Villarreal ;  
orientador, Carlos Becker Westphall - Florianópolis, SC,  
2014.

89 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa  
Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em  
Ciência da Computação.

Inclui referências

1. Ciência da Computação. 2. Gerenciamento de Redes. 3.  
Gerenciamento de Data Center. 4. Otimização de Nuvem Verde.  
5. CloudSim. I. Becker Westphall, Carlos. II. Universidade  
Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em  
Ciência da Computação. III. Título.

Sergio Roberto Villarreal

**MODELO DE GERENCIAMENTO DA INFRAESTRUTURA DE  
REDE PARA OTIMIZAÇÃO DE NUVEM VERDE**

Esta Dissertação foi julgada adequada para obtenção do Título de “Mestre em Ciência da Computação”, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-graduação em Ciência da Computação.

Florianópolis, 04 de dezembro de 2014.

---

Prof. Ronaldo dos Santos Mello, Dr.  
Coordenador do Curso

**Banca Examinadora:**

---

Prof. Carlos Becker Westphall, Dr.  
Orientador  
Universidade Federal de Santa Catarina

---

Prof. Luciano Paschoal Gaspar, Dr.  
Universidade Federal do Rio Grande do Sul

---

Prof. Lisandro Zambenedetti Granville, Dr.  
Universidade Federal do Rio Grande do Sul

---

Prof. Mario Antonio Ribeiro Dantas, Dr.  
Universidade Federal de Santa Catarina



Dedico este trabalho aos meus pais Roberto e Elena, à minha esposa Eliana e às minhas filhas María Elena e María Daniela.



## AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador, Prof. Carlos B. Westphall, por ter-me acolhido no LRG e ter colocado à minha disposição sua vasta experiência, ajudando-me em todas as etapas da pesquisa desde a escolha do assunto e, principalmente, pela valiosa orientação para a publicação dos nossos trabalhos.

À professora Carla M. Westphall, que, aceitando-me inicialmente como seu orientando, viabilizou o meu ingresso ao PPGCC e ao LRG.

Aos colegas do LRG, pelo respeito e pelos conhecimentos compartilhados.

Um agradecimento muito especial à minha filha Maríá Elena, formada em Ciência da Computação e em Design Gráfico, e profunda conhecedora e defensora das regras do português, não apenas pela impagável ajuda prestada com qualidade profissional... e de graça, mas principalmente pela imensa alegria e orgulho que, como pai, sinto por termos estudado, pesquisado e publicado juntos neste período do meu mestrado e do seu trabalho de conclusão do curso em Ciência da Computação.

À minha esposa Eliana e à minha filha Maríá Daniela, pelo importantíssimo incentivo, suporte e compreensão.

E a Deus, minha infinita gratidão porque sempre coloca no meu caminho pessoas maravilhosas que fazem minha vida muito abençoada.





Seamos custodios de la Creación, del designio de Dios inscrito en la naturaleza, guardianes del otro, del medio ambiente. Custodiar la Creación quiere decir hacer crecer el mundo con responsabilidad.  
(Papa Francisco, 2014)



## RESUMO

Os conceitos propostos pela TI Verde têm mudado as prioridades na concepção dos sistemas de informação e sua infraestrutura, acrescentando aos tradicionais requisitos de desempenho e custo, a necessidade de eficiência no consumo de energia. A abordagem de Computação em Nuvem Verde baseia-se nos conceitos de Computação em Nuvem e TI Verde com o objetivo de oferecer um ambiente computacional flexível e eficiente, porém suas estratégias não têm dado muita atenção para o consumo dos equipamentos de rede. Enquanto a *Green Networking* tem proposto princípios e técnicas que estão sendo padronizados e implementados nos novos equipamentos de rede, existe nos *data centers* uma grande quantidade de equipamentos legados sem esses recursos. Nesta dissertação, mostra-se que é possível aperfeiçoar a abordagem de nuvem verde e reduzir significativamente o consumo de energia elétrica dos *data centers* mediante a aplicação de um modelo de gerenciamento dos equipamentos de rede baseado em regras simples que tornam o consumo dos mesmos aproximadamente proporcional ao tráfego. A metodologia utilizada consistiu em pesquisa bibliográfica; definição do modelo através de expressões matemáticas e diagramas UML; verificação do modelo mediante um estudo de caso aplicado de forma analítica; desenvolvimento de extensões ao simulador CloudSim para suportar o modelo e a realização de simulações para verificar seu impacto em diferentes cenários.

**Palavras-chave:** Computação em Nuvem Verde. Gerenciamento de Redes. CloudSim.



## ABSTRACT

The concepts proposed by Green IT have changed the priorities in the design of information systems and infrastructure, adding to traditional performance and cost requirements, the need for efficiency in energy consumption. The approach of Green Cloud Computing builds on the concepts of Green IT and Cloud in order to provide a flexible and efficient computing environment, but their strategies have not given much attention to the energy consumption of the network equipment. While Green Networking has proposed principles and techniques that are being standardized and implemented in new networking equipment, there is a large amount of legacy equipment without these features in *data centers*. In this thesis, it is presented that it is possible to improve the green cloud approach and significantly decrease the energy consumption in *data centers* through the application of a network equipment management model based on simple rules that make its consumption approximately proportional to the traffic. The used methodology consisted on bibliographic research; definition of the model by mathematical expressions and UML diagrams; analytic verification of the model through its application in a case study; development of extensions to the CloudSim simulator to support the model and perform simulations to verify its impact in different scenarios.

**Keywords:** Green Cloud Computing. Network Management. CloudSim.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Arquitetura de nuvem. ....	33
Figura 2 – Arquitetura de camadas do CloudSim. ....	46
Figura 3 – Diagrama de Classes do CloudSim. ....	47
Figura 4 – Consumo em redes de computadores em função da carga. ....	52
Figura 5 – Modelo de Gerenciamento de nuvem verde OTM. ....	53
Figura 6 – Topologia típica da rede de um <i>data center</i> . ....	55
Figura 7 – Identificação e interconexões dos equipamentos. ....	63
Figura 8 – Sequência de aplicação das regras do modelo. ....	65
Figura 9 – Diagrama de Classes simplificado do NetPowerCloudSim. ....	68
Figura 10 – Interface gráfica do NetPowerCloudSim. ....	70
Figura 11 – Evolução do consumo da rede no Experimento 2. ....	74
Figura 12 – Evolução do consumo da rede no Experimento 3. ....	76





## LISTA DE QUADROS

Tabela 1 – Técnicas de Gerenciamento de Energia. ....	35
Tabela 2 – Técnicas Dinâmicas de Gerenciamento de Energia. ....	36
Tabela 3 – Comparação das características das extensões ao CloudSim. ....	54
Tabela 4 – Resultados do Experimento 1.....	72
Tabela 5 – Resultados do Experimento 2.....	73
Tabela 6 – Resultados do Experimento 3.....	75



## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ACPI – *Advanced Configuration and Power Interface*  
ALR – *Adaptive Link Rate*  
CPU – *Central Processing Unit*  
DCD – *Dynamic Component Deactivation*  
DPM – *Dynamic Power Management*  
DPS – *Dynamic Performance Scaling*  
DVFS – *Dynamic Voltage and Frequency Scaling*  
EC2 – *Elastic Compute Cloud*  
EEE – *Energy Efficient Ethernet*  
HD – *Hard Disk*  
IaaS – *Infrastructure as a Service*  
IEEE – *Institute of Electrical and Electronics Engineers*  
IT – *Information Technology*  
LAN – *Local Area Network*  
LRG – *Laboratório de Redes e Gerência*  
MC-LAG – *Multichassis Link Aggregation Group*  
MF – *Máquina Física*  
MV – *Máquina Virtual*  
OTM – *Organization Theory Model*  
PaaS – *Platform as a Service*  
PM – *Physical Machine*  
PUE – *Power Usage Effectiveness*  
RAM – *Random Access Memory*  
SaaS – *Software as a Service*  
SBP – *Shortest Path Bridging*  
SDN – *Software Defined Network*  
SLA – *Service Level Agreement*  
SNMP – *Simple Network Management Protocol*  
SOA – *Service-Oriented Architecture*  
SPM – *Static Power Management*  
STP – *Spanning Tree Protocol*  
TCP – *Transport Control Protocol*  
TI – *Tecnologia da Informação*  
TRILL – *Transparent Interconnection of Lot of Links*  
UFSC – *Universidade Federal de Santa Catarina*  
UML – *Unified Modeling Language*  
VIM – *Virtual Infrastructure Manager*  
VM – *Virtual Machine*  
VMM – *Virtual Machine Monitor*



## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b>	<b>21</b>
1.1 PROBLEMA	23
1.2 HIPÓTESE	24
1.3 OBJETIVOS	24
<b>1.3.1 Objetivo Geral</b>	<b>24</b>
<b>1.3.2 Objetivos Específicos</b>	<b>24</b>
1.4 JUSTIFICATIVA	24
1.5 PROPOSTA	25
1.6 MÉTODO	25
1.7 CONTRIBUIÇÕES	26
1.8 RESULTADOS ESPERADOS	26
1.9 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	27
<b>2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b>	<b>29</b>
2.1 COMPUTAÇÃO EM NUVEM	29
<b>2.1.1 Modelos de serviços</b>	<b>29</b>
<b>2.1.2 Modelos de implantação</b>	<b>31</b>
<b>2.1.3 Tecnologias</b>	<b>32</b>
<b>2.1.4 Implementação de uma nuvem</b>	<b>32</b>
2.2 TI VERDE	34
<b>2.2.1 Tecnologias e princípios aplicados ao hardware</b>	<b>35</b>
<b>2.2.2 Tecnologias e princípios aplicados ao <i>data center</i></b>	<b>38</b>
<b>2.2.3 Outras tecnologias e princípios</b>	<b>39</b>
2.3 GREEN NETWORKING	39
2.4 COMPUTAÇÃO EM NUVEM VERDE	42
<b>3 CLOUDSIM E TRABALHOS CORRELATOS</b>	<b>45</b>
3.1 CLOUDSIM	45
<b>3.1.1 Estrutura do CloudSim</b>	<b>45</b>
<b>3.1.2 Funcionamento do CloudSim</b>	<b>50</b>
3.2 PADRÃO DE CONSUMO DE EQUIPAMENTOS DE REDE	51
3.3 ORGANIZATION THEORY MODEL	53
3.4 EXTENSÕES AO CLOUDSIM	53
<b>4 MODELO DE GERENCIAMENTO</b>	<b>55</b>
4.1 BASES DO MODELO	55
4.2 EXTENSÕES AO ORGANIZATION THEORY MODEL	56
<b>4.2.1 Papéis de Gerência</b>	<b>56</b>
<b>4.2.2 Regras de Planejamento</b>	<b>57</b>
<b>4.2.3 Crenças</b>	<b>58</b>

<b>5 SIMULAÇÃO E RESULTADOS</b>	<b>59</b>
5.1 MODELO DE SIMULAÇÃO	59
<b>5.1.1 Descrição conceitual do modelo</b>	<b>59</b>
<b>5.1.2 Especificação do modelo</b>	<b>60</b>
5.1.2.1 <i>Definição da Topologia da rede</i>	61
5.1.2.2 <i>Cálculo do consumo da rede</i>	61
5.1.2.3 <i>Cálculo das interligações</i>	62
5.1.2.4 <i>Gerenciamento da rede</i>	64
<b>5.1.3 Estudo de caso</b>	<b>66</b>
5.1.3.1 <i>Cenário 1</i>	66
5.1.3.2 <i>Cenário 2</i>	66
5.1.3.3 <i>Cenário 3</i>	67
5.2 DESENVOLVIMENTO DAS EXTENSÕES AO CLOUDSIM	67
<b>5.2.1 NetPowerCloudSim</b>	<b>68</b>
5.3 VERIFICAÇÃO DO MODELO	71
<b>5.3.1 Experimentos e Resultados</b>	<b>71</b>
5.3.1.1 <i>Experimento 1</i>	71
5.3.1.2 <i>Experimento 2</i>	72
5.3.1.3 <i>Experimento 3</i>	74
<b>5.3.2 Discussão dos Resultados</b>	<b>76</b>
<b>6 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS</b>	<b>79</b>
6.1 PRINCIPAIS CONTRIBUIÇÕES	80
6.2 TRABALHOS FUTUROS	81
<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>83</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Tradicionalmente, os sistemas informáticos foram desenvolvidos com foco no desempenho e no custo, sem maior preocupação com a sua eficiência energética. No entanto, com o advento dos dispositivos móveis, esta característica tornou-se prioritária devido à necessidade de aumentar a autonomia das baterias.

Recentemente, a grande concentração de equipamentos nos *data centers* colocou em evidência os custos do manejo ineficiente da energia na infraestrutura de TI (Tecnologia da Informação), tanto em termos econômicos como ambientais, o que motivou a adequação e aplicação das tecnologias e conceitos desenvolvidos para a computação móvel, em todos os equipamentos de TI.

O termo *Green IT* ou TI Verde foi cunhado para se referir a esta preocupação com a sustentabilidade da TI e compreende os esforços destinados a reduzir o seu impacto ecológico durante a fabricação, uso e disposição final dos equipamentos.

A Computação em Nuvem se apresenta como uma importante alternativa para melhorar a eficiência dos processos de negócios, contribuindo com os objetivos da *Green IT*, já que desde o ponto de vista do usuário diminui o custo energético mediante o compartilhamento dos recursos e o dimensionamento mais eficiente e flexível dos sistemas. No entanto, desde o ponto de vista do provedor de serviços, a própria abordagem de nuvem precisa ser observada sob a óptica da *Green IT* para reduzir o consumo energético do *data center* sem afetar o desempenho dos sistemas. Esta abordagem é conhecida como Computação em Nuvem Verde.

Considerando-se apenas os equipamentos de TI, a principal causa de ineficiência no *data center* é a baixa taxa de utilização dos recursos, geralmente inferior a 50%, causada fundamentalmente pela variabilidade da carga de trabalho, que obriga a construir a infraestrutura para lidar com picos de trabalho que raramente acontecem, mas que degradam a qualidade do serviço se o aplicativo está sendo executado em um servidor totalmente ocupado (BELOGLAZOV et al., 2011).

A estratégia utilizada para lidar com esta situação é a consolidação da carga de trabalho, que consiste em alocar toda a carga de trabalho na mínima quantidade possível de recursos físicos para mantê-los com a maior taxa de ocupação possível, e colocar os recursos físicos inutilizados em um estado de baixo consumo de energia. O desafio consiste em como lidar com os picos de carga não previstos e o custo da ativação dos recursos inativos (WESTHALL et al., 2014). A

virtualização, amplamente utilizada na abordagem de Cloud, e a possibilidade de migrar máquinas virtuais têm contribuído para implementar esta estratégia com maior eficiência (GARG; BUYYA, 2012).

Segundo Calheiros et al. (2011), a realização de testes em sistemas computacionais em nuvem de grande porte não é viável em ambientes reais, devido ao custo, à rigidez física da estrutura, às diferentes exigências de configuração, e à dificuldade para reproduzir experimentos em condições controladas.

Os autores afirmam que estas limitações podem ser superadas mediante o uso de simuladores, e apresentam o CloudSim, um *framework* de código aberto para a modelagem e simulação de ambientes computacionais em nuvem, que pode simular a operação de um ou vários *data centers* de grande porte, sendo executado em um único computador convencional. Com este simulador, é possível realizar experimentos para validar algoritmos de consolidação de carga, medir consumo elétrico e calcular as violações aos níveis de serviço comprometidos, no entanto, seu uso demanda um considerável esforço para interpretar o código e estendê-lo.

As estratégias para melhorar a eficiência nos *data centers* têm se baseado, principalmente, nos servidores e nos sistemas de refrigeração e de alimentação elétrica, enquanto a rede de interconexão, que representa uma fração importante do consumo, não tem recebido tanta atenção, e os algoritmos propostos para a consolidação de carga dos servidores, geralmente, desconsideram a consolidação do tráfego de rede (ABDULLAH, 2014).

Os conceitos da TI Verde, embora de forma tardia, têm alcançado também o projeto e configuração dos equipamentos de rede, dando origem à *Green Networking*, que tem que lidar com um problema central: o consumo dos equipamentos de rede tradicionais é praticamente independente do volume do tráfego (JING et al., 2013).

Segundo Bianzino et al. (2012), tradicionalmente, o projeto de sistemas de rede tem seguido dois princípios totalmente opostos aos objetivos da *Green Networking*, o sobredimensionamento para suportar picos de demandas, e a redundância com o único intuito de assumir a tarefa quando outro equipamento falha. Desta forma a taxa de utilização das redes é sempre muito baixa e, para contornar este problema, a *Green Networking* tem como estratégias principais a computação proporcional que se aplica para adequar, tanto a velocidade de processamento dos equipamentos como a velocidade dos links à carga de trabalho, e a



consolidação de tráfego, que é feita considerando os padrões de tráfego e desligando componentes não necessários.

Enquanto as técnicas da *Green Networking* começam a ser padronizadas e implementadas nos novos equipamentos de rede, uma grande quantidade de equipamentos legados<sup>1</sup> forma a infraestrutura dos *data centers* atuais. Em trabalhos que serão apresentados na fundamentação teórica, se demonstra que é possível gerenciar estes equipamentos de forma que tenham um consumo aproximadamente proporcional à carga de trabalho e que estas técnicas, embora com menor impacto, são também efetivas no gerenciamento de equipamentos atuais com recursos de *Green Networking*.

Existe, então, a necessidade, e a possibilidade, de dotar os sistemas de gerenciamento de Nuvem Verde de mecanismos de interação com os sistemas de gerenciamento da rede do *data center*, para sincronizar a consolidação da carga e o desligamento de servidores, com as necessidades de consolidação do tráfego da rede.

## 1.1 PROBLEMA

Existe, nos *data centers*, uma grande quantidade de equipamentos de rede legados, cujo consumo de energia não é proporcional à carga de trabalho. No entanto, estratégias de economia de energia no *data center* e algoritmos de consolidação de carga prestam pouca atenção ao consumo elétrico da rede de interconexão e às necessidades de consolidação do tráfego.

Quanto mais eficiente se torna o gerenciamento das máquinas virtuais e dos servidores físicos, maior é a participação da rede no consumo total do *data center*, e maior é o impacto de incluir os equipamentos de rede no modelo de nuvem verde.

Desta forma, o modelo de gerenciamento de recursos em nuvem verde do Laboratório de Redes e Gerência (LRG) da UFSC (Universidade Federal de Santa Catarina) deve ser ampliado para controlar os recursos de rede de forma coordenada com as mudanças de estado dos servidores, com a finalidade de maximizar a eficiência energética da abordagem.

---

<sup>1</sup> Nesta dissertação, são considerados legados os equipamentos de rede fabricados até o ano de 2010 sem tecnologias de *Green Networking*.

## 1.2 HIPÓTESE

É possível obter ganhos significativos na eficiência energética de *data centers* que utilizam a abordagem de nuvem verde, mediante o adequado gerenciamento dos equipamentos de rede legados e atuais.

## 1.3 OBJETIVOS

### 1.3.1 Objetivo Geral

O objetivo deste trabalho é obter ganhos significativos na eficiência energética dos *data centers* mediante a aplicação de um modelo de gerenciamento de rede baseado em papéis, regras e crenças.

### 1.3.2 Objetivos Específicos

- Criar um modelo de gerenciamento dos equipamentos de rede de um *data center* baseado em regras e crenças com a finalidade de melhorar a eficiência energética da rede.
- Ampliar o modelo de gerenciamento de nuvem verde do LRG incorporando os papéis, as regras e as crenças necessárias para o gerenciamento dos equipamentos de rede com foco na eficiência energética sem perda de desempenho.
- Estender o simulador CloudSim para suportar o modelo proposto e permitir a realização de experimentos para validar os ganhos de eficiência em diferentes cenários.
- Determinar, mediante simulações, o percentual de participação da rede no consumo total do *data center* e o possível impacto da aplicação do modelo e de outras técnicas de gerenciamento de energia.
- Criar uma interface gráfica para a versão estendida do CloudSim que permita a realização de experimentos de forma simples e seu uso com fins didáticos.

## 1.4 JUSTIFICATIVA

Estudos do Gartner Group demonstram que a emissão de gás carbônico provocada pela infraestrutura de TI representa 2% do total das emissões do planeta, tendo um volume equivalente ao das emissões do transporte aéreo, porém com uma perspectiva de crescimento muito

maior (PETTEY, 2007). Outro estudo publicado pela mesma consultora sinaliza que do total do consumo de energia da TI, o 23% acontece nos *data centers* (KUMAR; MIERITZ, 2007).

O consumo de energia elétrica é o principal custo operacional dos *data centers*, e por este motivo existe uma crescente preocupação pelo desenvolvimento e adoção de estratégias para reduzir esta despesa e aumentar a lucratividade (JING et al., 2013).

## 1.5 PROPOSTA

A proposta deste trabalho é ampliar o OTM incluindo os papéis, as regras e as crenças necessárias para gerenciar a rede de computadores de forma que seu consumo seja aproximadamente proporcional à carga de trabalho tanto utilizando dispositivos de rede *energy-aware* quanto legados.

Criar um modelo de simulação que permita representar a rede de um *data center* e aplicar as regras e as crenças conforme as mudanças de estado dos servidores, e verificar analiticamente este modelo mediante sua aplicação em um estudo de caso.

Ampliar o simulador CloudSim, criando ou estendendo as classes necessárias para a representação da rede e para o gerenciamento da mesma conforme às mudanças de estado do *data center* e às regras e crenças do modelo.

Criar uma interface gráfica para a versão estendida do CloudSim que permita a realização de simulações da operação do *data center* e da sua rede, de forma simples e sem necessidade de entender e alterar o código do *framework*.

Finalmente, verificar o modelo de gerenciamento mediante a realização de simulações que permitam determinar seu impacto no consumo da rede e do *data center* em diferentes cenários.

## 1.6 MÉTODO

O método proposto consiste em uma pesquisa bibliográfica inicial para estudar os princípios e o estado da arte das técnicas de gerenciamento de energia no *data center* e da Computação em Nuvem Verde, assim como para apresentar os trabalhos correlatos nos quais é baseada a proposta.

A definição do modelo será feita através da representação matemática da topologia padrão da rede do *data center*, de expressões matemáticas para o cálculo do consumo dos equipamentos da rede em

diferentes condições de configuração e de diagramas UML (*Unified Modeling Language*) para expressar o fluxo de aplicação das regras de gerenciamento e a interação com os usuários. Este modelo será verificado mediante um estudo de caso aplicado de forma analítica que demonstre sua aplicabilidade e a correção das fórmulas de cálculo.

Para o desenvolvimento das extensões ao simulador CloudSim e da interface gráfica; serão definidos os requisitos funcionais e não funcionais que devem ser atendidos; as classes a serem estendidas ou implementadas serão modeladas em diagramas UML; o código será implementado na linguagem Java; será criada uma classe especial para realizar testes de unidade; e os testes de integração serão realizados mediante a execução de experimentos simples que permitam a análise exaustiva dos registros de execução e a comparação dos resultados obtidos com os resultados esperados.

Finalmente, serão realizadas simulações da operação de data centers de diferente porte para determinar a participação da rede no consumo total do *data center* e o impacto da aplicação do modelo de gerenciamento proposto na economia de energia da rede e do *data center* como um todo.

## 1.7 CONTRIBUIÇÕES

A principal contribuição deste trabalho será fornecer um modelo de gerenciamento dos equipamentos de rede do *data center* para otimizar a abordagem de nuvem verde e a implementação de um simulador para validar o impacto da aplicação do modelo.

Também se espera, através da realização de experimentos com o simulador, obter dados sobre a participação da rede no consumo total do *data center* em diversos cenários, e sobre o impacto da aplicação de diversas técnicas de gerenciamento de energia.

## 1.8 RESULTADOS ESPERADOS

A partir do entendimento do modelo e da verificação do impacto dos resultados, o gerenciamento de equipamentos de rede legados e atuais com foco na eficiência no consumo de energia poderá ser incorporado às boas práticas de gerenciamento de redes, tanto em *data center* como em redes LAN (*Local Area Network*).

As extensões do CloudSim e sua interface gráfica poderão ser utilizados com fins didáticos, permitindo uma melhor compreensão da topologia e dos componentes da rede do *data center*, assim como do

impacto de seu correto projeto e gerenciamento no consumo de energia elétrica do *data center*.

## 1.9 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Após esta introdução, serão apresentados, no Capítulo 2, a fundamentação teórica e, no capítulo 3, os trabalhos correlatos nos quais se fundamenta a proposta desta dissertação. No Capítulo 4, será apresentado o modelo de gerenciamento proposto e, no Capítulo 5, descrito o modelo de simulação, o desenvolvimento das extensões ao CloudSim, os experimentos realizados para verificar o modelo de gerenciamento e os resultados obtidos. Finalmente, no Capítulo 6, serão relatadas as conclusões e as propostas de trabalhos futuros.



## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo, é apresentada a revisão bibliográfica conforme publicado em Westphall e Villarreal (2013).

### 2.1 COMPUTAÇÃO EM NUVEM

Buyya, Yeo e Venugopal (2008, p. 6) definem computação em nuvem como:

“um sistema de computação distribuído orientado ao consumidor, que consiste em uma coleção de computadores virtualizados e interconectados que são fornecidos dinamicamente e apresentados como um ou mais recursos computacionais unificados, conforme acordo de nível de serviço negociado entre o provedor de serviços e o consumidor”.

As principais características do ambiente de computação em nuvem são o compartilhamento dos recursos que servem a múltiplos usuários e são fornecidos dinamicamente segundo a capacidade contratada por cada um; a entrega dos serviços pela rede, que ocorre na forma de *web services* implementados mediante a arquitetura orientada a serviços; e a flexibilidade caracterizada pela possibilidade de acrescentar ou retirar recursos de forma rápida e sem maior esforço administrativo por parte do fornecedor (MELL; GRANCE, 2011).

No caso das nuvens comerciais, o usuário subscreve os serviços que deseja, especifica a qualidade requerida mediante um acordo de nível de serviço (SLA – *Service Level Agreement*) negociado com o prestador e paga conforme o consumo mediante um modelo *pay-per-use* (BUYA; YEO; VENUGOPAL, 2008).

Para possibilitar estas características, a abordagem se sustenta nas tecnologias de *cluster* computacional, computação em grade, virtualização, SOA (*Service-Oriented Architecture*), *web services* e computação autônoma (VOORSLUYS; BROBERG; BUYYA, 2011).

#### 2.1.1 Modelos de serviços

Os serviços oferecidos mediante a abordagem de computação em nuvem podem ser diferenciados em três classes, conformando um modelo de três camadas, em que cada uma pode ser implementada

utilizando os serviços da camada inferior (VOORSLUYS; BROBERG; BUYYA, 2011). A classe de serviços mais simples que pode ser oferecida é a infraestrutura como serviço. Em um segundo nível pode ser oferecida a plataforma de desenvolvimento como serviço. Finalmente, no terceiro nível, os aplicativos podem ser oferecidos como serviço. Esta classificação é explicada detalhadamente por Voorsluys, Broberg e Buyya (2011) e também por Garg e Buyya (2012) e a seguir é descrita brevemente:

- Infraestrutura como Serviço (*IaaS – Infrastructure as a Service*): neste modelo, são oferecidos recursos como servidores, armazenamento e comunicação na forma de serviços. O usuário pode administrar estes recursos instalando *software*, acrescentando discos virtuais, configurando usuários e permissões etc. O EC2 (*Elastic Compute Cloud*) da *Amazon Web Services* é um exemplo deste tipo de serviço com recursos como escalamento automático e importação de máquinas virtuais do usuário (AMAZON, 2014).
- Plataforma como Serviço (*PaaS – Platform as a Service*): neste modelo, os provedores de computação em nuvem oferecem um ambiente de desenvolvimento para que o usuário possa criar e hospedar suas próprias aplicações e distribuí-las como serviço sem preocupação a respeito da infraestrutura necessária. Este ambiente possui também componentes que podem ser incluídos nos aplicativos e serviços para monitorá-los e gerenciá-los. O *Windows Azure* da Microsoft é um exemplo deste tipo de serviço (MICROSOFT, 2014).
- Software como Serviço (*SaaS – Software as a Service*): neste modelo, os aplicativos são distribuídos como serviços e acessados por demanda. Neste modelo, os usuários não precisam manter infraestrutura própria nem instalar software, já que o aplicativo e seus dados associados são acessados por meio da Internet, mediante um navegador. Este modelo, além de liberar o usuário de toda complexidade, permite diminuir consideravelmente os preços, visto que o fornecedor pode diluir os custos compartilhando o aplicativo com um grande número de usuários. O *Google Apps* é um exemplo deste tipo de serviço (GOOGLE, 2014).



## 2.1.2 Modelos de implantação

A abordagem de computação em nuvem é um modelo comercial e público, mas suas vantagens o tornam conveniente também para administrar a infraestrutura interna das organizações o que deu origem a três modelos de implantação, como descrevem Mell e Grance (2011):

- Nuvem pública: modelo que corresponde ao ambiente descrito até agora, no qual fornecedores implementam os serviços na sua infraestrutura e os disponibilizam publicamente pela Internet, por assinatura. Devido ao compartilhamento dos recursos e à delegação do controle para o fornecedor, os principais desafios deste modelo estão relacionados à segurança da informação e à qualidade do serviço (MELL; GRANCE, 2011).
- Nuvem privada: modelo que consiste em implementar uma nuvem sobre a própria infraestrutura para fornecer serviços de TI aos usuários internos (GARG; BUYYA, 2012). Com esta configuração, o *data center* torna-se mais ágil e flexível e obtém-se um manejo mais eficiente dos recursos, porém perde-se a característica da elasticidade da nuvem, porque a escalabilidade se vê limitada pelos recursos físicos disponíveis (VOORSLUYS; BROBERG; BUYYA, 2011).
- Nuvem híbrida: modelo que consiste em complementar uma nuvem privada com serviços de uma nuvem pública, obtendo-se as vantagens dos dois modelos. Esta abordagem é possível porque a nuvem privada pode utilizar interfaces compatíveis com as interfaces das nuvens públicas (MELL; GRANCE, 2011).

Ampliando estes conceitos, alguns autores como Rochwerger et al. (2011) têm proposto arquiteturas para a organização de nuvens públicas em federações, que permitem que um provedor utilize, quando necessário, capacidade de outros provedores para superar limitações próprias do ambiente como a falta de escalabilidade de um provedor isolado e a falta de interoperabilidade entre provedores.

Do ponto de vista do consumo de energia do sistema, é importante enfatizar que a definição de nuvem privada diz respeito ao domínio administrativo e não à localização física dos recursos, que podem ser locais ou remotos. Também é importante considerar que uma nuvem, seja pública ou privada, pode ser implementada sobre uma

federação de *data centers* do mesmo domínio administrativo distribuídos geograficamente, o que gera oportunidades de alocar a carga de trabalho, visando a uma maior eficiência no consumo de energia.

### 2.1.3 Tecnologias

Como já mencionado, a computação em nuvem é o fruto da evolução e uso combinado de diversas tecnologias que possibilitam aos fornecedores configurar uma estrutura flexível, criar sobre esta um ambiente isolado para cada usuário e fornecer acesso por meio de uma rede de comunicação na forma de serviços contratados na modalidade autosserviço, e faturados conforme utilização.

Conforme descrito por Voorsluys, Broberg e Buyya (2011), entre estas tecnologias se encontram cluster e grid, que forneceram os fundamentos de como aproveitar o hardware distribuído, a virtualização do hardware que possibilita a implementação de um ambiente isolado para cada cliente sobre recursos físicos compartilhados, os *web services* e SOA, que forneceram padrões de software adequados para a entrega dos recursos pela rede na forma de serviços e, finalmente, a computação autônoma que procura a melhoria dos sistemas pela diminuição da participação humana em sua operação e que confere ao ambiente de computação em nuvem algumas de suas principais características. Os mencionados autores descrevem brevemente estas tecnologias e fornecem referências a diversos trabalhos sobre elas.

### 2.1.4 Implementação de uma nuvem

A camada mais baixa da arquitetura de computação em nuvem é formada pelo hardware, composto pelas máquinas físicas (PM – *Physical Machine*) ou servidores e sistemas de armazenamento interligados por uma rede local (GARG; BUYYA, 2012). Estes equipamentos estão tipicamente alojados em um *data center* que concentra uma grande quantidade de *hardware* e que conta com uma infraestrutura de fornecimento de energia elétrica e outra de resfriamento que são de fundamental importância para o correto funcionamento dos equipamentos e para a eficiência energética do sistema (MINAS; ELLISON, 2009).

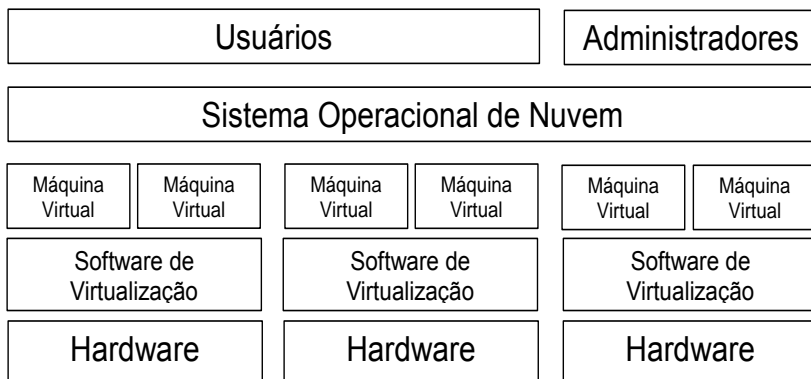
Sobre cada máquina física, é instalado o software de virtualização (VMM – *Virtual Machine Monitor*), que tem como finalidade instanciar as máquinas virtuais (VM – *Virtual Machine*) que serão fornecidas para

o cliente e sobre as quais são executados os aplicativos. Cada máquina virtual tem seu próprio sistema operacional e deve ser configurado tanto seu *software* como seu ambiente de rede (CHAVES; URIARTE; WESTPHALL, 2011).

Finalmente, é instalado o software para computação em nuvem, também conhecido como VIM (*Virtual Infrastructure Manager*) ou Sistema Operacional de Nuvem, que é o *middleware* que gerencia os recursos físicos e virtuais, e fornece a interface para os usuários e para os administradores (VOORSLUYS; BROBERG; BUYYA, 2011). Entre as funcionalidades deste *middleware* contam-se o suporte a máquinas virtuais e a múltiplos VMM, virtualização do armazenamento e dos recursos de rede, gerenciamento de *clusters* virtuais, alocação dinâmica de recursos, alta disponibilidade, tolerância a falhas e uma interface para o fornecimento dos recursos sob demanda e na forma de autosserviço. Isto é detalhadamente explicado por Voorsluys, Broberg e Buyya (2011).

Chaves, Uriarte e Westphall (2011) descrevem a implantação, a configuração e o monitoramento de uma nuvem privada de pequeno porte, utilizando os *softwares open source* Linux, Xen, Eucalyptus e Nagios, que pode ser utilizada como laboratório para diversos fins. Na Figura 1, são representados as camadas e os componentes da arquitetura de nuvem.

Figura 1 – Arquitetura de nuvem.



Fonte: Elaborada pelo autor.

## 2.2 TI VERDE

Estudos do *Gartner Group* demonstram que a emissão de gás carbônico provocada pela infraestrutura de TI representa 2% do total das emissões do planeta, tendo um volume equivalente ao das emissões do transporte aéreo, porém com uma perspectiva de crescimento muito maior (PETTEY, 2007). Outro estudo publicado pela mesma consultora sinaliza que do total do consumo de energia da TI, 23% acontece nos *data centers* e 24% nas comunicações fixas e móveis (KUMAR; MIERITZ, 2007).

Estes dados evidenciam a necessidade de tornar a TI mais eficiente e diminuir seu impacto ambiental, que é o foco da TI verde e, ao mesmo tempo, marcam uma importante oportunidade de redução de custos, o que torna a TI verde viável e atrativa, inclusive para organizações voltadas ao lucro (MURUGESAN; LAPLANTE, 2011).

Bianzino et al. (2012) afirmam que, do ponto de vista da engenharia, a TI verde pode ser melhor interpretada como a redução da energia necessária para realizar uma determinada tarefa, mantendo o nível de desempenho. Em geral, este é o foco que se observa na maioria dos trabalhos. Mas, pode-se afirmar que, caminhando nesta direção, se caminha também na direção dos objetivos ambientais.

O início da computação verde, e da aplicação deste termo, foi marcado pelo lançamento em 1992 do programa voluntário Energy Star da Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos, que visava a identificar e promover produtos eficientes do ponto de vista energético para reduzir a emissão de gases (ENERGY STAR, 2014). Atualmente, numerosas iniciativas de governos e da indústria impulsionam a TI verde. Bolla et al. (2011) elencam os principais projetos de governos, assim como das principais instituições de padronização relacionados com este tema.

Atualmente, alguns autores mencionam uma segunda onda da TI verde, voltada à aplicação criativa da TI para tornar mais sustentáveis os processos de todas as outras áreas de atividade, inclusive a produção e distribuição de energia elétrica (MURUGESAN; LAPLANTE, 2011).

Deve-se observar que, embora a maioria das estratégias propostas pela *Green IT* contribui tanto no aspecto ambiental como no econômico, algumas somente têm impacto econômico e não representam redução na emissão de gases, como por exemplo, alocar a carga de trabalho em um *data center* de um país onde a energia seja mais barata. Outras têm impacto ecológico, mas não reduzem custos, como colocar o *data center*

em local abastecido por fontes de energia renováveis, ou próximo às fontes de energia.

A seguir, apresentam-se os princípios e as tecnologias básicas utilizados na TI verde conforme classificados por Beloglazov et al. (2011).

### 2.2.1 Tecnologias e princípios aplicados ao hardware

Conforme apresentado na Tabela 1, As técnicas de gerenciamento de energia aplicadas ao *hardware* podem ser classificadas como técnicas estáticas ou SPM (*Static Power Management*), que aplicam melhorias permanentes baseadas, principalmente, no desenvolvimento e utilização de componentes mais eficientes, e como técnicas dinâmicas ou DPM (*Dynamic Power Management*), que aplicam medidas temporárias baseadas no conhecimento em tempo real do uso dos recursos e da carga de trabalho (BELOGLAZOV et al., 2011).

As técnicas utilizadas para o gerenciamento dinâmico da energia são DCD (*Dynamic Component Deactivation*), que consiste em desligar componentes nos períodos de inatividade, também conhecidas como “*sleep state*”, e DPS (*Dynamic Performance Scaling*), que consiste em reduzir gradualmente o desempenho quando a demanda diminui (BELOGLAZOV et al., 2011). A Tabela 2 mostra um resumo das técnicas utilizadas em DPM.

Tabela 1 – Técnicas de Gerenciamento de Energia.

Tipo	Características
Estáticas SPM	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Melhoras permanentes</li> <li>• Aplicadas no projeto</li> <li>• Componentes mais eficientes</li> <li>• Efeito garantido</li> </ul>
Dinâmicas DPM	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Medidas temporárias</li> <li>• Conhecimento em tempo real da carga</li> <li>• Requerem configuração e políticas</li> <li>• Desafio: custo da transição</li> </ul>

Fonte: Elaborada pelo autor.

Tabela 2 – Técnicas Dinâmicas de Gerenciamento de Energia.

Técnica	Características
<b>DCD</b> <i>(Dynamic Component Deactivation)</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Desativação dinâmica de componentes</li> <li>• Desligar componentes não utilizados</li> </ul>
<b>DPS</b> <i>(Dynamic Performance Scaling)</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Adaptação dinâmica de desempenho</li> <li>• Redução ou aumento gradual da velocidade de operação</li> </ul>

Fonte: Elaborada pelo autor.

As técnicas dinâmicas permitem criar dispositivos “*Energy Aware*”, que implementam a estratégia conhecida como computação proporcional, ou seja, dispositivos que apresentam um consumo de energia proporcional ao seu nível de utilização e baseiam-se, principalmente, na tecnologia DVFS e no padrão ACPI descritos a seguir:

- DVFS (*Dynamic Voltage and Frequency Scaling*): considerando que o consumo de um circuito em atividade é proporcional à frequência de operação e ao quadrado da voltagem, esta técnica consiste em diminuir intencionalmente a performance do processador quando não está sendo totalmente utilizado, mediante a redução da frequência e da tensão elétrica. Esta técnica é suportada pela maioria dos equipamentos modernos (BELOGLAZOV et al., 2011).
- ACPI (*Advanced Configuration and Power Interface*): é um padrão aberto proposto em 1996 pela Intel, Microsoft, Toshiba, HP e Phoenix para definir uma interface unificada de configuração e gerenciamento de energia centrada no sistema operacional e que descreve interfaces independentes de plataforma para descoberta de hardware, configuração, gerenciamento e monitoramento de energia (ACPI, 2013). A maior contribuição deste modelo, além da padronização, é ter deslocado a implementação das técnicas de gerenciamento dinâmico do *hardware* para o *software*,

trazendo flexibilidade para a configuração de políticas e sua automação (BELOGLAZOV et al., 2011).

Conforme descrito por Beloglazov et al. (2011), as estratégias de DPM seriam simples de implementar se não fosse pelo custo de passar de um estado para outro, que representa um *overhead* não somente pelo atraso que afeta o desempenho do sistema, como também pelo consumo adicional de energia. Portanto, uma mudança de estado somente se justifica se o período de aproveitamento for suficientemente longo para cobrir o custo da transição, fato que não é fácil de prever. Existe uma grande quantidade de trabalhos destinados a propor métodos eficientes para resolver este problema como o de Albers (2010) e o de Beloglazov et al. (2011) que identificam aqui a necessidade tanto de melhorar estaticamente o custo de transição como os algoritmos de predição.

De acordo com Minas e Ellison (2009), as maiores fontes de consumo de energia em computadores são a CPU (*Central Processing Unit*), a memória RAM (*Random Access Memory*) e as perdas na fonte de alimentação, indicando também que todos os componentes apresentam maior eficiência quando operam em uma alta taxa de utilização.

As CPUs têm recebido constantes aprimoramentos, sendo que os processadores *multicore* são estaticamente muito mais eficientes que os tradicionais e mediante a implementação de técnicas dinâmicas podem reduzir seu consumo em até um 70%, conservando sua capacidade de executar os programas. Outros componentes não suportam estados de baixa energia ativos e devem ser parcialmente ou totalmente desligados, o que leva a grandes perdas de desempenho pelo tempo de ativação (MINAS; ELLISON, 2009).

Os mesmos autores indicam que o intenso uso da virtualização tem feito com que os servidores tenham grande quantidade de memória RAM e que o consumo de energia da mesma seja maior que o consumo da CPU, enfatizando, portanto, a necessidade de desenvolver novas técnicas e abordagens para reduzir o consumo da memória. Sugerem também melhorias nas fontes de alimentação como área prioritária de pesquisa.

Finalmente, observa-se que as técnicas de gerenciamento estático são de grande importância e devem ser levadas em conta no momento do projeto dos sistemas e da aquisição do hardware. No entanto, uma vez adquiridos, seus benefícios estão garantidos, diferentemente das técnicas de gerenciamento dinâmico, que requerem configuração, políticas e gerenciamento, que podem maximizar seu aproveitamento ou inclusive prejudicá-lo. Este fato sinaliza a necessidade de fornecer

recursos mais eficazes para a medição e o monitoramento do consumo de energia dos equipamentos.

## 2.2.2 Tecnologias e princípios aplicados ao *data center*

O consumo de energia elétrica representa o principal custo operacional dos *data centers*. Esta energia é consumida, principalmente, pelos equipamentos de TI, pelo sistema de resfriamento e pelo próprio sistema de distribuição de energia, sendo que em muitos casos o consumo destes dois últimos itens, considerados *overhead*, é maior que o dos equipamentos de TI propriamente ditos (BELOGLAZOV et al., 2011).

Para quantificar o tamanho deste *overhead*, se utiliza o PUE (*Power Usage Effectiveness*), que é um parâmetro que representa a relação entre a energia total consumida pelo *data center* e a energia efetivamente utilizada nos equipamentos de TI. Os valores típicos do PUE dos *data centers* atuais variam entre 1,3 e 3,0 (GARG e BUYYYA, 2012), mas grandes avanços estão acontecendo neste campo mediante melhorias na infraestrutura e na localização das instalações. Em 2012, a Google anunciava um PUE médio de 1,12 em seus *data centers* (GOOGLE, 2012) e a empresa Facebook afirmava ter um *data center* com PUE de 1,07 no Círculo Polar Ártico (FACEBOOK, 2013).

Considerando apenas os equipamentos de TI, a principal causa de ineficiência no *data center* é a baixa taxa de utilização média dos recursos, geralmente inferior a 50%, causada fundamentalmente pela variabilidade da carga de trabalho, que obriga a construir a infraestrutura para lidar com picos de trabalho que raramente acontecem, mas que degradariam a qualidade de serviço se o aplicativo estivesse sendo executado em um servidor totalmente ocupado (BELOGLAZOV et al., 2011).

A estratégia utilizada para lidar com esta situação é a consolidação da carga de trabalho, que consiste em alocar toda a carga de trabalho na mínima quantidade possível de recursos físicos para mantê-los com a maior taxa de ocupação possível e colocar os recursos físicos inutilizados em um estado de baixo consumo de energia. O desafio é como lidar com os picos de carga não previstos e o custo da ativação dos recursos inativos (GARG; BUYYYA, 2012). A virtualização e a possibilidade de migrar máquinas virtuais, junto com a concentração dos arquivos em sistemas de armazenamento centralizados, tem contribuído para implementar esta estratégia com maior eficiência (BELOGLAZOV et al., 2011).



### 2.2.3 Outras tecnologias e princípios

Beloglazov et al. (2011) referenciam, classificam e comentam uma série de trabalhos dedicados à aplicação de estratégias de DPM nos sistemas operacionais e nos sistemas de virtualização.

No nível do sistema operacional, os autores citam propostas para servidores e para dispositivos móveis que têm como objetivo minimizar o consumo de energia, evitar a perda de desempenho e garantir que seja respeitado o orçamento de energia, mencionando também que algumas destas propostas são implementadas como extensões ao *kernel* do Linux e outras propõem sistemas operacionais específicos.

No nível de virtualização, como o *software* de virtualização se encontra entre o *hardware* e o sistema operacional, ele deve assumir o gerenciamento de energia, monitorando o desempenho total do sistema e aplicando as técnicas DPS ou DCD apropriadas aos componentes de hardware ou, preferencialmente, atendendo às chamadas dos sistemas operacionais de cada VM e mapeando-as em mudanças no *hardware*. As principais soluções de virtualização utilizadas atualmente não suportam este último modo, que é proposto em pesquisas (BELOGLAZOV et al., 2011).

Nathuji e Shwan (2007) propõem uma técnica chamada “*soft resource scaling*” para aplicar computação “proporcional” em máquinas virtuais. Esta técnica consiste em emular o DPS de *hardware* limitando o tempo de uso de CPU da VM e aplicando as capacidades de *scheduling* do VMM com base nas chamadas ACPI dos sistemas operacionais das VMs. Os autores demonstram que a combinação de *scaling* de *hardware* e de *software* proporciona maior economia de energia.

## 2.3 GREEN NETWORKING

A infraestrutura de rede e de telecomunicações contribui com uma importante porcentagem do consumo de energia e das emissões da TI e possui características diferenciadas, motivo pelo qual os esforços para torná-la mais eficiente e ambientalmente correta constituem uma área especial de estudo, que tem sido identificada sob o nome de *Green Networking* (BIANZINO et al., 2012). Como o ambiente de computação em nuvem é fortemente dependente das comunicações, os princípios de *Green Networking* são fundamentais para avançar para o conceito de computação em nuvem verde.

Segundo Bianzino et al. (2012), tradicionalmente, o projeto de sistemas de rede tem seguido dois princípios totalmente opostos aos objetivos da *Green Networking*: o sobredimensionamento para suportar picos de demandas com margem para eventos imprevistos, e a redundância com o único intuito de assumir a tarefa quando outro equipamento falha. Este fato torna a *Green Networking* tecnicamente desafiadora, tendo como principal objetivo introduzir o conceito de *energy-aware* no projeto de redes, sem comprometer o seu desempenho nem a sua confiabilidade.

As principais estratégias utilizadas em *Green Networking* são as já apresentadas para o *hardware* de equipamentos finais, porém com particularidades na sua implementação (CHRISTENSEN et al., 2010). A computação “proporcional” se aplica para adequar, tanto a velocidade de processamento dos equipamentos como a velocidade dos *links* à carga de trabalho em um determinado momento. A consolidação da carga de trabalho é feita considerando os padrões de tráfego diário e semanal e desligando componentes não necessários. A virtualização é utilizada para consolidar recursos físicos, principalmente, roteadores (BIANZINO et al., 2012).

A implementação da computação “proporcional” é feita utilizando DFVS para regular a velocidade de processamento de pacotes, ALR (*Adaptive Link Rate*) para regular a velocidade dos links conforme o tráfego do momento, e técnicas DCD (*Sleep State*) para colocar equipamentos em modo de baixo consumo de energia, complementado com técnicas especiais de *proxying* para manter a presença na rede dos dispositivos inativos (BOLLA et al., 2011).

A técnica ALR se fundamenta na observação de que o consumo de energia de um *link* de rede local ou de rede de acesso depende, principalmente, da sua velocidade, sendo relativamente independente da sua taxa de utilização, e propõe adaptar a capacidade do *link*, seja colocando-o em *sleep state* durante períodos de inatividade (que podem ser longos ou muito breves), seja reduzindo sua velocidade em períodos de baixa utilização (IEEE, 2010).

Segundo explicado em Bolla et al. (2011), em equipamentos de rede, o *sleep state*, apresenta o desafio especial de que um dispositivo inativo perde sua presença na rede, que é mantida mediante diferentes tipos de mensagens que geram tráfego permanente. Este tráfego constante entre equipamentos de rede também afeta a eficácia das técnicas de DPM nos equipamentos finais, onde a CPU deve ser “acordada” pela placa de rede para responder mensagens de certo modo triviais. Conforme Bianzino et al. (2012), a estratégia proposta para

resolver esses problemas é usar *interface proxying*, que consiste em delegar o tratamento deste tráfego, que muitas vezes requer respostas simples ou pode ser descartado, para outra entidade mais econômica que a CPU. A implementação desta entidade pode ser feita como mais uma funcionalidade da placa de rede, ou como uma unidade externa que pode atender a vários clientes, seja na forma de servidor dedicado, seja como uma função dos switches. Bianzino et al. (2012) e Bolla et al. (2011) explicam com detalhes diversas propostas de implementação destas funcionalidades.

A técnica DCD é a base do padrão da IEEE 802.3az EEE (*Energy Efficient Ethernet*) ratificado em setembro de 2010 (IEEE, 2010), sendo que já se encontram no mercado equipamentos que atendem este padrão, inclusive com funcionalidades extras conhecidas no mercado como *Green Ethernet*, como os switches que reduzem o uso de energia em portas em que o equipamento final está sem uso e que reduzem a potência de transmissão com base no comprimento do link (DLINK, 2014).

No nível de camada física, as principais propostas são referentes à troca das redes metálicas por redes ópticas porque estas são mais eficientes, além de fornecer maior largura de banda, porém ainda não apresentam a flexibilidade das redes metálicas e do domínio eletrônico, já que no domínio óptico não é possível a “bufferização” (BIANZINO et al, 2012).

Segundo Bianzino et al. (2012), no nível de camada de rede, várias técnicas foram propostas para implementar a estratégia *energy-aware routing* com a finalidade de consolidar o tráfego e de privilegiar as rotas com dispositivos *energy-aware* e apontam também que, nesta camada, são necessárias adaptações nos protocolos de roteamento para evitar a instabilidade das tabelas de roteamento provocadas pelas mudanças instantâneas introduzidas pelas técnicas de DPM.

Os mesmos autores citam que na camada de transporte existem propostas para tornar *energy-aware* o protocolo TCP (*Transport Control Protocol*), com modificações como acrescentar uma opção *tcp\_sleep* ao cabeçalho para informar que o transmissor entrará em estado de *sleep*, fazendo que a outra parte atrase o envio dos dados recebidos da aplicação, colocando-os em um *buffer*. Também colocam que existem propostas para modificar alguns protocolos de camada de aplicação para incluir esta sinalização, embora alguns autores considerem mais adequado implantá-las na camada de transporte disponibilizando *green sockets* para os desenvolvedores.

Bianzino et al. (2012) sugerem que, embora conceitualmente deva-se respeitar o princípio de independência das camadas, é importante considerar a necessidade de troca de informações entre camadas para chegar a soluções práticas que permitam a coordenação de todas as medidas para otimizar os resultados. *Energy aware* TCP, por exemplo, poderia enviar *sleep requests* mais frequentemente se estivesse sendo utilizado um *link wireless*.

Blanquicet e Christensen (2008) propõem extensões ao protocolo SNMP (*Simple Network Management Protocol*), para que os agentes exponham o estado de energia dos dispositivos para a rede, incluindo suas capacidades de gerenciamento de energia, as configurações atuais e estatísticas, e afirmam que, com estas informações disponíveis, o administrador da rede pode monitorar remotamente o consumo de energia dos equipamentos de TI e fazer mudanças nas configurações.

Finalmente, Bianzino et al. (2012) e Bolla et al. (2011), enfatizam a necessidade urgente de padronizar métricas para dimensionar a eficiência dos equipamentos e conjuntos de *benchmark* que permitam avaliar e comparar com eficácia diferentes soluções.

## 2.4 COMPUTAÇÃO EM NUVEM VERDE

Como já apresentado, a abordagem de computação em nuvem representa uma interessante alternativa para a utilização eficiente dos recursos computacionais, uma vez que permite consolidar a carga de trabalho de uma grande quantidade de usuários, e também porque seus recursos favorecem a consolidação da carga de trabalho dentro do *data center*.

Conforme Werner et al. (2011), o modelo de computação em nuvem verde supera a abordagem de nuvem convencional, colocando o foco do gerenciamento dos recursos do *data center* na economia de energia mantendo o desempenho comprometido no acordo de nível de serviço, e baseia-se, fundamentalmente, na aplicação de critérios de provisionamento, alocação, redimensionamento e migração de máquinas virtuais para obter uma eficiente consolidação de carga nos servidores físicos. Estes autores propuseram uma solução para o controle integrado dos servidores e dos sistemas de suporte do *data center* baseado no modelo de Teoria da Organização que, validado mediante simulações, demonstrou obter até 40% de economia de energia comparado ao modelo de nuvem tradicional.

Srikantaiah, Kansal e Zhao (2008) propõem uma estratégia de *energy aware consolidation* para o ambiente de computação em nuvem,

determinando que o consumo de energia por transação responde a uma curva em forma de “u”. Existe ineficiência quando a taxa de utilização é baixa, mas também quando é alta devido à degradação do desempenho. De acordo com estes resultados, definem que o objetivo da consolidação deve ser manter os servidores bem utilizados, o que significa 70% para a CPU e 50% para os HDs (*Hard Disks*).

No entanto, alguns autores chamam a atenção para o fato de que, considerando o consumo de todos os componentes envolvidos na execução de uma tarefa na nuvem, e não apenas o *data center*, para certo tipo de aplicações e determinados tipos de serviços, este ambiente não é o mais eficiente. Baliga et al. (2011) e Feng-Sem, Kwang-Cheng e Chen-Mou (2011) demonstram esta afirmação mediante modelos analíticos comentados a continuação.

Baliga et al. (2011) se propõem a analisar o consumo total de energia no ambiente de computação em nuvem, comparando a energia necessária para realizar determinadas tarefas neste ambiente e em ambiente tradicional. Utilizam para isto, o modelo de cadeia de suprimentos de logística e consideram o custo de processar, guardar e transportar bits de dados ao invés de itens físicos. O modelo contempla três tipos de serviços (*storage*, *software* e processamento como serviço) e dois ambientes (nuvem privada ou virtual), considerando a nuvem privada sempre local e partindo da premissa de que o usuário de nuvem pública é sempre doméstico e o de nuvem privada sempre empresarial. Os autores chegam a conclusões como: apesar de o armazenamento na nuvem ser mais eficiente, o armazenamento em nuvem pública pode ser três ou quatro vezes mais custoso energeticamente devido ao incremento do consumo na rede quando os arquivos são grandes e frequentemente acessados; e *software* como serviço em nuvem pública pode ser ineficiente quando requer taxa de *refresh* de tela alta.

Feng-Sem, Kwang-Cheng e Chen-Mou (2011) também se propõem a determinar em quais condições o consumo de energia é reduzido pelo uso do ambiente de computação em nuvem, propondo um modelo matemático que considera separadamente o consumo em terminais de usuário, rede e servidores, e três tipos de aplicações comparando seu consumo em ambiente convencional e em ambiente de nuvem. O modelo demonstra que nem sempre a eficiência da nuvem no *data center* compensa o custo da comunicação, inclusive considerando a economia que existe também nos terminais. Também advertem que, devido à grande proliferação de equipamentos móveis, *green mobile communications*, deve ser um dos pilares da computação em nuvem verde.

Beloglazov et al. (2011) consideram que os conceitos de *intercloud* e *data centers* geograficamente distribuídos devem ser desenvolvidos, não apenas para melhorar a escalabilidade dos fornecedores sem sobredimensionar a infraestrutura, como também para permitir a realocação da carga de trabalho para que seja executada em *data centers* onde, no momento, a energia seja menos custosa, como por exemplo pelo uso de energia solar durante o dia em diferentes fusos horários ou pela maior eficiência na refrigeração pelas condições climáticas externas.

Estas constatações evidenciam a necessidade de maiores esforços para aplicar os conceitos de TI verde ao ambiente de computação em nuvem, considerando a participação e interação de todos os elementos do sistema, para minimizar o uso de recursos, mantendo a qualidade de serviço requerida, que é o objetivo da computação em nuvem verde.

### 3 CLOUDSIM E TRABALHOS CORRELATOS

Neste capítulo, são apresentados os trabalhos nos quais é baseada a proposta desta dissertação, conforme publicado em Villarreal, Westphall e Westphall (2014). O capítulo está organizado em quatro seções: na primeira, são apresentados os conceitos relacionados ao simulador CloudSim; na segunda, os relacionados aos padrões de consumo dos equipamentos de rede; na terceira, os referentes ao modelo de gerenciamento de nuvem *Organization Theory Model*; e, na quarta seção, os vinculados a outras extensões ao CloudSim.

#### 3.1 CLOUDSIM

O CloudSim é uma ferramenta extensível de código aberto para simulação de sistemas computacionais em nuvem desenvolvida na Universidade de Melbourne, Austrália, e oferece suporte à modelagem e simulação de ambientes computacionais em nuvem de grande escala em um único computador e com baixo consumo de recursos computacionais (Calheiros et al. 2011).

Esta ferramenta foi projetada especificamente para a modelagem de infraestruturas de computação em nuvem, já que os simuladores de sistemas distribuídos existentes na época tinham sido desenvolvidos para modelar ambientes de Computação em Grade e não ofereciam suporte à simulação de ambientes virtualizados, nem recursos para a modelagem de *data centers* com grandes quantidades de servidores.

Segundo Calheiros et al. (2011), o CloudSim permite aos desenvolvedores testar o desempenho de suas políticas de provisionamento em um ambiente controlado e repetível, suporta a simulação de aplicações que apresentam comportamentos dinâmicos e, a partir da versão 2.0, é possível gerenciar o consumo de energia do *data center* através do objeto PowerModel.

##### 3.1.1 Estrutura do CloudSim

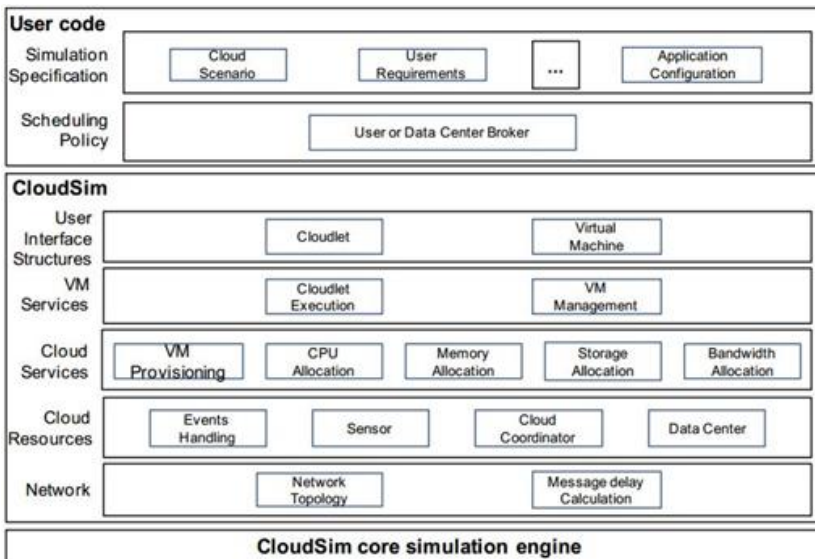
Segundo Calheiros (2011), o CloudSim, foi desenvolvido na linguagem de programação orientada a objetos Java, é seu código está organizado em três camadas, que são ilustradas na Figura 2 e descritas a seguir:

- Camada de núcleo: é a camada inferior da estrutura onde a simulação é processada. Fornece as funções básicas

para a execução da simulação como gerenciamento das filas, processamento de eventos, comunicação entre componentes e controle do relógio;

- Camada de simulação: é a camada que contém as classes de entidades que compõem o ambiente de computação em nuvem, como *data center*, máquinas físicas, máquinas virtuais, elementos de processamento e aplicações. Esta camada é responsável pela alocação de máquinas virtuais nas máquinas físicas, pelo gerenciamento da execução de aplicativos e pelo monitoramento do estado do sistema;
- Camada de usuário: é a camada superior da arquitetura, na qual é definido o cenário da simulação através de configurações como: quantidade e tipo de máquinas físicas; número de aplicações que devem ser executadas e seus requisitos de processamento, quantidade e tipo máquinas virtuais, e políticas de escalonamento.

**Figura 2** – Arquitetura de camadas do CloudSim.

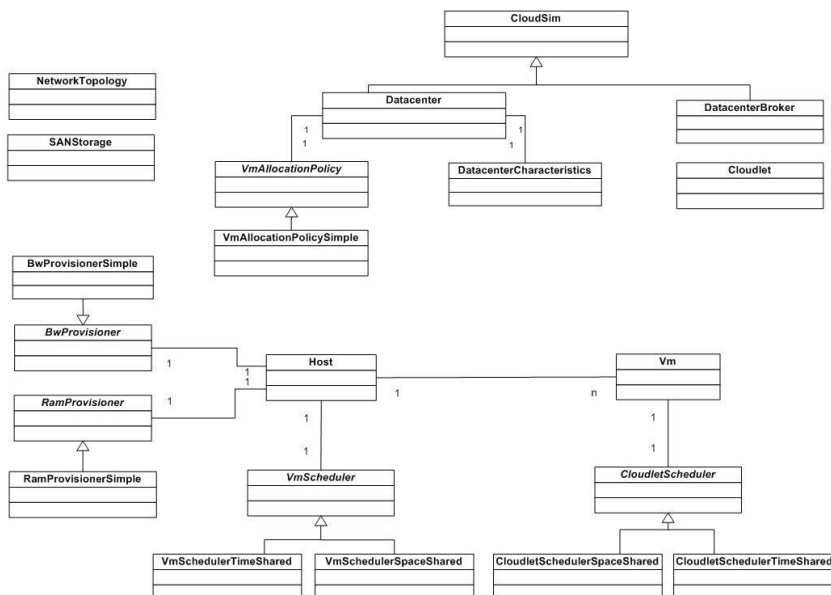


Fonte: Calheiros et al., 2011.



As principais classes que compõem a estrutura do CloudSim estão representadas no digrama de classes simplificado mostrado na Figura 3 e são descritas a seguir (CALHEIROS et al. 2011):

Figura 3 – Diagrama de Classes do CloudSim.



Fonte: Adaptado de Calheiros et al. (2011).

- *CloudSim*: Esta classe pertence ao núcleo do simulador, é auxiliada por outras, também do núcleo e que não são descritas neste trabalho, e é responsável por gerenciar a fila de eventos e controlar sua execução em cada passo da simulação. Os eventos gerados pelas entidades em tempo de execução são armazenados em uma fila de eventos futuros ordenada pelo atributo tempo. Quando o relógio da simulação coincide com o tempo em que um evento está agendado para ocorrer, este é transferido para a fila de eventos diferidos e um método de processamento de eventos é chamado para realizar as ações necessárias;

- *Datacenter*: classe que modela a infraestrutura sobre a qual se implementam os serviços oferecidos pelos provedores de computação em nuvem e consiste em um conjunto de máquinas físicas com características de hardware, como memória, quantidade de núcleos e capacidade de armazenamento, e que podem ser homogêneas ou heterogêneas;
- *DatacenterCharacteristics*: classe que contém as propriedades do *data center*, como arquitetura, sistema operacional, política de alocação, VMM e custos;
- *VmAllocationPolicy*: classe abstrata que representa a política de alocação de máquinas virtuais nas máquinas físicas e tem como principal função selecionar um recurso físico que atenda às exigências de memória, armazenamento e disponibilidade para hospedar uma MV. Este processo é realizado em dois estágios: primeiro, a máquina física é reservada e, depois da confirmação do usuário, a máquina virtual é efetivamente alocada. A política padrão utilizada é implementada pela classe *VmAllocationPolicySimple* que escolhe a máquina física com menor número de elementos de processamento em uso para alocar uma máquina virtual, mas esta classe pode ser estendida para implementar outras políticas;
- *Host*: classe que modela um recurso físico e seus atributos, como quantidade de memória e capacidade de armazenamento; política para o compartilhamento do poder de processamento entre MVs; e políticas de provisionamento de memória e largura de banda para MVs;
- *VmScheduler*: classe abstrata que representa a política de compartilhamento do poder de processamento entre as máquinas virtuais que executam em uma mesma máquina física. Pode ser estendida para suportar políticas específicas.
- *RamProvisioner*: classe abstrata que representa a política de provisionamento de memória RAM para as máquinas virtuais e é responsável por verificar se o recurso físico possui memória livre suficiente para a implantação e execução de determinada MV. É estendida pela classe

*RamProvisionerSimple*, que aloca a quantidade de memória requisitada pela máquina virtual, exceto se esta for maior que a memória disponível. Neste caso, o pedido é simplesmente rejeitado;

- *BwProvisioner*: classe abstrata que representa a política de provisionamento de largura de banda para as máquinas virtuais. Por padrão, é estendida pela classe *BwProvisionerSimple* que permite a uma máquina virtual reservar a largura de banda necessária desde que esta quantidade esteja disponível na máquina física, mas pode ser estendida para modelar outras formas de provisionamento;
- *Vm*: classe que modela uma máquina virtual, gerenciada e hospedada por uma máquina física. Possui características como número de processadores, quantidade de memória RAM e política de alocação interna;
- *CloudletScheduler*: classe abstrata que pode ser estendida para implementar diferentes políticas de compartilhamento do poder de processamento de uma máquina virtual entre as aplicações nela executadas. Existem duas extensões de esta classe fornecidas pelo CloudSim: *CloudletSchedulerSpaceShared* e *CloudletSchedulerTimeShared* que implementam estratégias de espaço compartilhado e tempo compartilhado respectivamente;
- *Cloudlet*: classe que modela as aplicações que são executadas na nuvem. Cada aplicação possui um tamanho predeterminado e um tempo necessário para a transferência de dados, e sua complexidade é representada em função dos recursos computacionais requeridos para sua execução;
- *DatacenterBroker*: classe que modela um agente que opera em nome do usuário e é responsável pelas negociações entre ele e o provedor de nuvem para a alocação de aplicações. Primeiro, o agente busca provedores de serviços apropriados e, em seguida, realiza negociações de alocação de recursos e serviços para atender aos requisitos de qualidade de serviço. É possível

estender esta classe para a implementação de políticas de mediação personalizadas;

- *NetworkTopology*: classe que armazena informações sobre o comportamento da rede em de matrizes de latência que informam ao simulador o retardo que deve aplicar a eventos que dependem da velocidade de transmissão;
- *SANStorage*: classe que representa uma rede de armazenamento composta por um conjunto de discos rígidos conectados por uma rede local e pode ser utilizada para simular armazenamento e recuperação de dados.

### 3.1.2 Funcionamento do CloudSim

A entidade principal na modelagem de uma nuvem é o objeto *data center* que gerencia as máquinas físicas, às quais são atribuídas máquinas virtuais por meio de uma política de alocação definida pelo provedor de Nuvem. A alocação de máquinas virtuais refere-se ao processo de criar instâncias destas em máquinas físicas que atendem aos requisitos de *hardware*, como número de núcleos de processamento e quantidade de memória.

O processamento das aplicações é feito pelas máquinas virtuais, que monitoram e atualizam seu progresso continuamente. A cada passo da simulação, o *data center* chama um método que faz com que todas as máquinas físicas atualizem o *status* de suas máquinas virtuais. As máquinas físicas, por sua vez, atualizam o *status* de suas aplicações ativas e retornam o tempo do próximo evento. As máquinas físicas, então, enviam os menores tempos de finalização para o *data center* e estes tempos são armazenados na fila de eventos a serem processados.

No CloudSim, a latência do tráfego da rede é modelada através de informação armazenada em uma matriz de latência  $m \times n$ , em que cada posição  $e_{ij}$  representa o tempo de transferência de uma mensagem da entidade  $i$  para a entidade  $j$ . Mensagens enviadas entre entidades do CloudSim são processadas pelo objeto *NetworkTopology*, que possui a informação sobre a topologia da rede e acrescenta o valor de latência ao evento. No entanto, não existe representação dos equipamentos de rede nem do seu consumo de energia.

Para realizar simulações com o CloudSim, é necessário criar uma classe contendo um método principal para iniciar a aplicação. Esta

classe deve fixar o tempo da simulação e configurar os atributos e instanciar todos os objetos necessários para representar ambiente a ser simulado como o próprio *data center*, as máquinas físicas, as máquinas virtuais, as aplicações e as políticas de alocação e migração de máquinas virtuais. Finalmente esta classe deve chamar ou método iniciar passando como parâmetros todos os objetos instanciados.

### 3.2 PADRÃO DE CONSUMO DE EQUIPAMENTOS DE REDE

Mahadevan et al. (2009) apresentam os resultados de uma pesquisa realizada para determinar o consumo de uma grande variedade de equipamentos de rede em diferentes condições de uso. O estudo foi realizado medindo o consumo dos equipamentos em redes em produção, o que possibilitou caracterizar o gasto energético em função da configuração e uso dos equipamentos e chegar a uma expressão matemática que permite calcular o mesmo com uma margem de erro de 2%. Esta expressão determina que o consumo total tem uma componente fixa, que é o consumo com todas as portas desligadas, e uma componente variável que depende da quantidade de portas ativas e da velocidade configurada de cada uma.

A pesquisa determinou que a energia consumida pelos equipamentos é relativamente independente do volume do tráfego e do tamanho dos pacotes transmitidos, e dependente da quantidade de portas ativas e da velocidade configurada dessas portas, sendo que a energia economizada é maior quando se diminui a velocidade de 1 Gbps para 100 Mbps, do que passando de 100 Mbps para 10 Mbps.

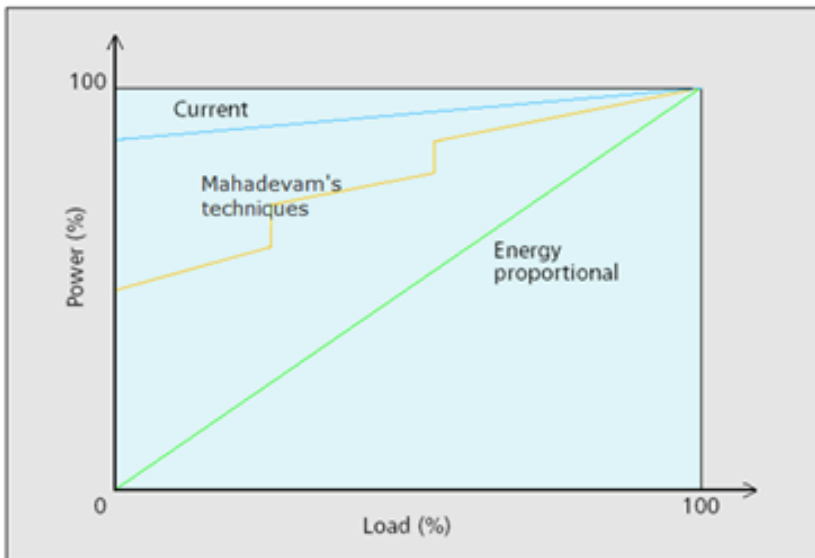
Esta pesquisa apresenta também uma tabela com os tempos médios necessários para alcançar o estado operacional depois do *boot* de cada categoria de equipamento, e demonstra que o comportamento dos equipamentos atuais não é proporcional, como esperado conforme as propostas da *Green Networking*, e, portanto, a aplicação de técnicas de consolidação de tráfego tem o potencial de produzir uma importante economia de energia.

Mahadevan et al. (2011), continuando o trabalho apresentado nos parágrafos anteriores, colocam a ideia de que o consumo em switches idealmente deveria ser proporcional à carga de tráfego, mas como em dispositivos legados a realidade é bastante diferente, propõem técnicas para tornar o consumo da rede em geral mais próximo do comportamento proporcional mediante a aplicação de configurações disponíveis em todos os dispositivos.

As configurações propostas são: diminuir a velocidade das portas com baixa utilização, desligar as portas não utilizadas, desligar módulos que tem todas suas portas desligadas e desligar switches sem uso. Os autores, mediante medições em campo, demonstraram que é possível obter uma economia de 35% no consumo da rede de um *data center* com a aplicação destes ajustes. Também, com o uso de simulações, demonstraram que, em condições ideais, é possível uma economia de 74% no consumo da rede combinando consolidação da carga dos servidores com consolidação do tráfego da rede.

Os resultados obtidos são ilustrados na Figura 4, que mostra o comportamento ideal identificado como “*Energy Proportional*”, que corresponderia a uma rede com equipamentos totalmente “*Energy Aware*”, a curva real da maioria das redes atuais, onde o consumo é praticamente independente da carga, identificada como “*Current*” e, finalmente, a curva do consumo obtido aplicando as técnicas propostas por eles.

Figura 4 – Consumo em redes de computadores em função da carga.



Fonte: Mahadevan et al (2011).

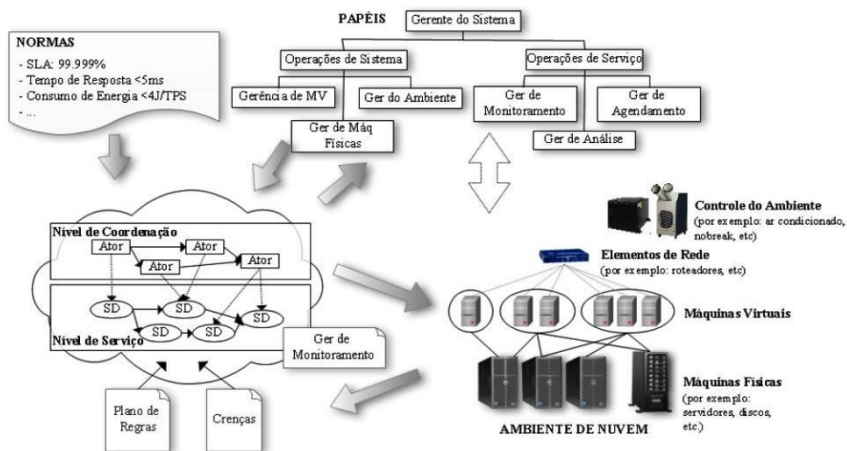
### 3.3 ORGANIZATION THEORY MODEL

Werner (2011) propõe o *Organization Theory Model* (OTM), uma solução para o controle integrado dos servidores e dos sistemas de suporte em nuvem verde baseada no modelo de Teoria da Organização. Esta abordagem define um modelo de alocação e distribuição de máquinas virtuais que, validado mediante simulações, demonstrou obter até o 40% de economia de energia em relação ao modelo de nuvem tradicional.

O modelo proposto determina quando desligar, redimensionar ou migrar máquinas virtuais, e quando ligar ou desligar máquinas físicas com base na carga de trabalho e nas exigências do SLA. No entanto, a solução, que prevê também o desligamento e ativação dos sistemas de suporte, não especifica o gerenciamento dos equipamentos de rede.

Na Figura 5, é apresentada a arquitetura do sistema de gerenciamento proposto, que é baseado em normas, papéis, regras e crenças.

Figura 5 – Modelo de Gerenciamento de nuvem verde OTM.



Fonte: Werner (2011).

### 3.4 EXTENSÕES AO CLOUDSIM

Freitas (2011) realizou extensões ao simulador CloudSim, criando as classes necessárias para suportar o OTM, apresentado em

parágrafos anteriores, o que permitiu calcular a economia de energia e as violações ao SLA em vários cenários e validar o modelo. Nem o modelo nem as extensões do simulador consideram o consumo dos equipamentos de rede.

Garg e Buyya (2012) apresentam o NetworkCloudSim, uma extensão do CloudSim que incorpora recursos para a modelagem do comportamento de aplicações e da rede interna do *data center*. Este simulador possui as classes necessárias para a representação dos equipamentos de rede e do tráfego da mesma, porém, não suporta a representação e o cálculo do consumo elétrico dos equipamentos do *data center*.

Beloglazov (2013) apresentou uma nova versão do simulador de Calheiros, o CloudSim 2.0, também conhecida como PowerCloudSim, que permite representar consumo de energia elétrica dos componentes do *data center*, capacidade que não era contemplada pelo núcleo do *framework*, e que incorpora também a possibilidade de simular aplicações com cargas de trabalho dinâmicas. Esta versão não suporta a representação dos equipamentos da rede e seu consumo elétrico.

Na Tabela 3, são comparadas as características da versão original do CloudSim com as extensões apresentadas nesta seção e com a extensão proposta nesta dissertação.

Tabela 3 – Comparação das características das extensões ao CloudSim.

Versão	Características			
	Representação MFs e MVs	Consumo MFs e infraestrutura	Representação da rede	Consumo da rede
Calheiros (2011)	Sim	Não	Não	Não
Freitas (2011)	Sim	Sim	Não	Não
Garg e Buyya (2012)	Sim	Não	Sim	Não
Beloglazov (2012)	Sim	Sim	Não	Não
Proposta	Sim	Sim	Sim	Sim

Fonte: Elaborada pelo autor.



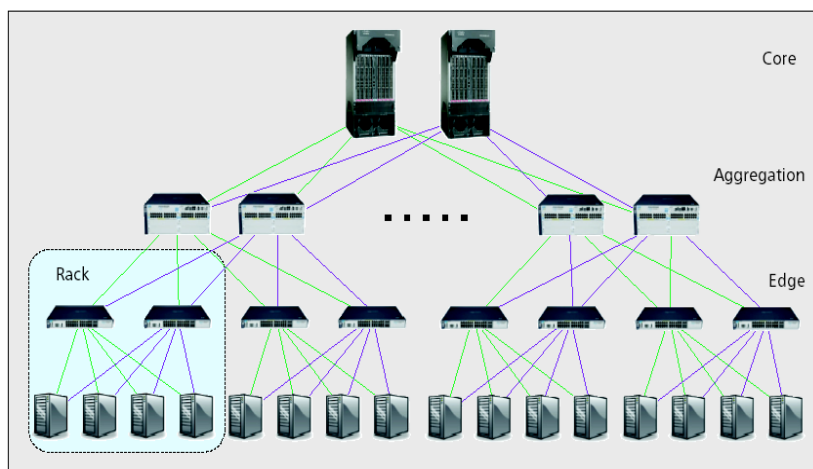
## 4 MODELO DE GERENCIAMENTO

Neste capítulo, são apresentadas as extensões necessárias ao OTM para implementar o modelo de gerenciamento de rede proposto.

### 4.1 BASES DO MODELO

A proposta baseia-se na topologia de rede típica de um *data center*, apresentada na Figura 6, onde os switches são organizados em uma hierarquia de três camadas: camada de núcleo identificada como “*Core*”, camada de agregação identificada como “*Aggregation*” e camada de acesso ou de borda identificada como “*Edge*”. Nesta topologia, existe redundância nas conexões entre camadas de forma tal que a falha de um equipamento não afeta a conectividade.

Figura 6 – Topologia típica da rede de um *data center*.



Fonte: Mahadevan et al (2009).

Os racks, ou gabinetes de telecomunicações, são a unidade básica desta configuração e cada rack acomoda uma determinada quantidade de servidores e dois switches de camada de acesso. Cada servidor tem duas placas de rede conectadas cada uma a um switch de acesso diferente.

Como descrito por De Cusatis, Carranza e De Cusatis (2012), em instalações tradicionais, o gerenciamento da redundância dos links é feito mediante o *Spanning Tree Protocol* (STP) e suas variantes, ou pelo protocolo de Grupos de Agregação de Links Multichassi (MC-LAG),

que permite utilizar simultaneamente os links redundantes ampliando a sua capacidade. Em configurações mais recentes, novos protocolos, como TRILL (Transparent Interconnection of Lot of Links) e SBP (Shortest Path Bridging), estão sendo aplicados para esta finalidade superando as limitações dos protocolos clássicos para atender as necessidades dos *data centers* atuais.

Conforme apresentado em Liu et al. (2013), existem outras topologias de rede, em uso e propostas, para os *data centers*. Algumas são fixas e baseadas na topologia de árvore e de características similares à topologia apresentada. Outras são chamadas de recursivas e são baseadas na formação de células para criar estruturas de nível superior como DCell e BCube. Existem ainda outras topologias chamadas flexíveis, que combinam camadas de switches tradicionais com comutação de circuitos ópticos. Todas estas topologias envolvem camadas de switches tradicionais e o modelo de gerenciamento proposto pode ser adaptado mediante a adequação das regras e crenças. O impacto da aplicação do modelo não dependerá da topologia e sim da eficiência e do grau de proporcionalidade dos equipamentos utilizados.

## 4.2 EXTENSÕES AO ORGANIZATION THEORY MODEL

Para incluir o gerenciamento dos equipamentos de rede legados e de tecnologia *energy-aware* no modelo de gerenciamento proposto por WERNER et al. (2011), de forma tal que o consumo total da rede tenha um comportamento aproximadamente proporcional à carga processada, se propõe acrescentar à sua arquitetura os elementos descritos a seguir.

### 4.2.1 Papéis de Gerência

Deve-se acrescentar aos componentes de “Operações do Sistema”, o papel “Gerência de Equipamentos de Rede”, que atua como interface entre o modelo e os equipamentos de rede sendo responsável pelas ações realizadas sobre estes equipamentos, como por exemplo: ativar ou desativar portas, ativar ou desativar equipamentos ou mudar configurações do protocolo MC- LAG.

O papel de “Gerência de Monitoração”, responsável pela coleta de informações da estrutura e sua compreensão, deverá ser ampliado com mecanismos de interação com o sistema de gerenciamento da rede de computadores, para obter dados a partir dos quais podem ser tomadas decisões sobre configuração da velocidade das portas, ou sobre ativar ou

desativar componentes e portas. Estas decisões serão guiadas pelas regras e crenças.

#### 4.2.2 Regras de Planejamento

As regras são utilizadas em momentos em que decisões devem ser tomadas e, portanto, devem ser acrescentadas regras para configurar os equipamentos de rede em concordância com a ativação, desativação e taxa de ocupação das Máquinas Físicas.

Para implementar as configurações propostas por MAHADEVAN (2011), já apresentadas, são indicadas as seguintes regras:

- Se uma máquina física é desligada, as portas correspondentes dos switches de camada de acesso devem ser desligadas;
- Se a ocupação de uma máquina física é menor que um valor pré-definido, suas interfaces de rede e as portas correspondentes dos switches de acesso devem ter sua velocidade reduzida;
- Se a largura de banda agregada das portas de *downlink* de um switch de camada de acesso é menor que um valor pré-definido, suas portas de *uplink* devem ter sua velocidade reduzida;
- Se um switch de camada de acesso tem todas suas portas desligadas, deve ser desligado;
- Se um switch de camada de acesso é desligado, as portas correspondentes do switch de camada de agregação devem ser desligadas;
- Se a largura de banda agregada das portas de *downlink* de um switch de camada de agregação é menor que um valor pré-definido, suas portas de *uplink* devem ter sua velocidade reduzida;
- Se um switch de camada de agregação tem todas suas portas desligadas, deve ser desligado;
- Se um switch de camada de agregação é desligado, as portas correspondentes do switch de núcleo devem ser desligadas;
- Se um módulo de um switch de camada de núcleo tem todas suas portas desligadas, deve ser desligado;

- Se um switch de camada de núcleo tem todos seus módulos desligados, deve ser desligado.

Devem ser incluídas, também, todas as regras inversas às enumeradas.

A aplicação destas regras não afeta a confiabilidade da rede, uma vez que portas e equipamentos são desligados apenas quando servidores são desligados. O desempenho do sistema será prejudicado somente se o custo de ativação dos equipamentos de rede for maior que o custo de ativação dos servidores.

Para maior eficiência da consolidação do tráfego, o modelo deve considerar os racks nas estratégias de alocação e migração de máquinas virtuais, sendo necessárias regras que consolidem as máquinas físicas ativas na menor quantidade de racks possível.

### 4.2.3 Crenças

As crenças são um conjunto de conhecimentos empíricos utilizados para aprimorar as decisões, e estão vinculados às características dos recursos utilizados e aos tipos de serviços implementados em cada caso específico.

Para cada uma das regras listadas no parágrafo anterior, devem-se enunciar crenças relacionadas com o consumo de energia. Se consideramos Christensen et al. (2010), podemos citar como exemplo:

- Desligar uma porta de *downlink* de um switch de camada de acesso gera uma economia de 500 mWh;
- Reduzir a velocidade de uma porta de 10 Gbps para 1 Gbps gera uma economia de 4,5 Wh.

Também poderão ser incluídas crenças a respeito dos tempos requeridos para que uma porta ou equipamento desligado fique operacional depois da inicialização. Estas crenças serão utilizadas para tomar decisões quando for necessário considerar requerimentos de desempenho.

## 5 SIMULAÇÃO E RESULTADOS

A configuração padrão da rede do *data center*, as regras e as crenças propostas constituem a base para a criação de um modelo de simulação para verificar diferentes estratégias e regras em cenários específicos e com diferentes cargas de trabalho. Conforme já feito em trabalhos anteriores por Werner (2011) e Freitas (2011), será posteriormente estendido o CloudSim de Calheiros et al. (2011) para incorporar este modelo de simulação e serão realizados experimentos para verificar o modelo de gerenciamento.

### 5.1 MODELO DE SIMULAÇÃO

Nesta seção, são apresentadas a descrição conceitual e a especificação do modelo de simulação. Posteriormente, um estudo de caso é aplicado de forma analítica com a finalidade de testar a especificação e verificar que as variáveis de estado e as equações propostas são corretas e suficientes para modelar o sistema e calcular seu consumo a cada passo da simulação.

#### 5.1.1 Descrição conceitual do modelo

As entidades que devem ser modeladas são os switches, a topologia da rede e o gerenciador de rede, e sua finalidade é representar a rede do *data center* e o seu consumo, calcular o consumo da rede em cada frame da simulação, aplicar as regras de gerenciamento conforme as mudanças de estado dos servidores no frame e, ao finalizar, a simulação informar o consumo total da rede.

As entradas do modelo serão a quantidade de servidores do *data center* e as crenças que devem poder ser configuradas para criar diferentes cenários. Com base na quantidade de servidores, deverá ser calculada a quantidade de racks e de equipamentos de rede.

Como saídas, o simulador deve informar a configuração inicial da rede e seu consumo instantâneo nessa configuração e, no final da simulação, deve fornecer o consumo total da rede durante o período simulado.

As variáveis de estado devem descrever quantos switches de cada tipo formam a topologia e a situação de cada switch, incluindo se está ligado, o número e tipo de portas, e a configuração de cada porta, que deve indicar se está ligada e sua velocidade atual de funcionamento.

Visto que a topologia da rede é uma hierarquia, pode-se estabelecer uma relação matemática na interconexão dos equipamentos se estes são identificados por números. Portanto, não é necessário incluir no vetor de estado informações sobre estas conexões já que, quando seja necessário, poderá calcular-se a porta de switch que corresponde a cada interface de rede de um servidor ou a cada porta de *uplink* de um switch mediante uma expressão matemática.

Como variáveis exógenas, devem ser consideradas a quantidade de servidores e o estado dos mesmos, sendo que, no instante inicial da simulação, devem ser todos representados como ligados e com sua taxa de utilização máxima.

Como eventos primários, serão considerados o desligamento e ativação de servidores e a mudança da taxa de utilização dos mesmos quando ultrapasse de forma crescente ou decrescente um limiar pré-estabelecido. Os eventos primários, por sua vez, gerarão eventos secundários conforme as regras de planejamento propostas para o gerenciamento da rede na seção 3.1.1.2.

Para poder analisar o desempenho do sistema e as violações ao SLA, o simulador deveria conhecer o tempo necessário para colocar em funcionamento cada tipo de equipamento e, no momento da ativação dos servidores, comparar o tempo de ativação do servidor com o tempo de ativação das portas e dos equipamentos de rede e utilizar o maior. Porém, para simplificar o modelo, será considerado que o tempo de ativação dos servidores é sempre maior que o tempo de ativação dos equipamentos de rede e, portanto, não será necessário incluir elementos para determinar o impacto no desempenho do sistema.

### **5.1.2 Especificação do modelo**

Nesta seção, são especificados os detalhes que devem ser considerados para o desenvolvimento do simulador.

Para a implementação do simulador, considerou-se que cada rack acomoda 40 servidores de uma unidade de uso de rack (1 U) e dois switches de camada de acesso de 48 portas Gigabit Ethernet de *downlink* e duas portas 10 Gigabit Ethernet de *uplink*. Cada servidor tem duas placas de rede Gigabit Ethernet, cada uma conectada a um switch de acesso diferente.

Considerou-se também que, se existe apenas um rack, não serão necessários switches de camada de agregação e que até 12 racks podem ser atendidos por dois switches de camada de agregação de 24 portas 10

Gigabit Ethernet com *uplinks* de 10 Gigabit Ethernet ou 40 Gigabit Ethernet, sem necessidade de switches de núcleo.

Finalmente, considerou-se que, com mais de 12 racks, serão necessários dois switches de núcleo com um módulo de 24 portas para cada 144 racks, ou seja, 5.760 servidores. A velocidade das portas dos módulos dependerá da velocidade dos *uplinks* dos switches de agregação.

#### 5.1.2.1 Definição da Topologia da rede

O simulador deve definir a topologia da rede e criar todos os seus componentes a partir da quantidade de servidores físicos, mediante as seguintes regras:

- Se a quantidade de servidores é menor que 40, a topologia terá apenas dois switches de camada de acesso interligados entre si pelas portas de *uplink*. Desligar as portas não utilizadas;
- Se a quantidade de servidores é maior que 40 e menor ou igual a 480 (12 Racks), colocar dois switches de camada de acesso para cada 40 servidores ou fração e dois switches de camada de agregação interligados entre si pelas portas de *uplink*. Desligar portas não utilizadas dos switches de ambas as camadas;
- Se a quantidade de servidores for maior que 480, aplicar a regra anterior para cada grupo de 480 servidores ou fração, acrescentar dois switches de camada de núcleo e colocar, em cada um, um módulo de 24 portas para cada 5.760 servidores (144 racks) ou fração. Desligar as portas não utilizadas.

#### 5.1.2.2 Cálculo do consumo da rede

O consumo total da rede estará dado pela soma dos consumos de todos os switches que a compõem e, fundamentado nas constatações de Mahadevan et al. (2011), a fórmula para o cálculo do consumo dos switches e dos módulos será:

$$\text{Consumo W} = \text{CB} + N^{\circ} \text{ P } 40 \text{ Giga} \times 10 + N^{\circ} \text{ P } 10 \text{ Giga} \times 5 + N^{\circ} \text{ P } \text{Giga} \times 0.5 + N^{\circ} \text{ P } \text{Fast} \times 0,3 \quad (1)$$

Nesta expressão, o consumo em Watts é calculado somando o consumo base (CB), que é um valor fixo próprio de cada equipamento, e os consumos das portas ativas em cada velocidade, que é a componente variável.

O consumo de cada tipo de porta é próprio de cada equipamento, mas os valores propostos são os valores médios conforme os trabalhos já citados, e o simulador deve permitir configurar estes valores para criar cenários com diferentes tipos de equipamentos.

Em (1), se o switch tem chassi, deve-se acrescentar o consumo base do mesmo.

### 5.1.2.3 Cálculo das interligações

Para poder determinar as interconexões entre os equipamentos mediante expressões matemáticas, os racks, os servidores, os switches de acesso, os switches de agregação e os switches de núcleo devem ser identificados por uma numeração contínua iniciando em zero. As portas dos switches de acesso e agregação também serão identificadas por números iniciando em zero em cada equipamento. As portas dos módulos dos switches de núcleo serão identificadas com números começando em zero e continuado a numeração do módulo anterior.

Este padrão de identificação e de interconexão é mostrado de forma simplificada na Figura 7.

Desta forma, conhecendo o identificador de um servidor (ID Serv), pode-se calcular o ID dos seus switches de acesso e as portas correspondentes mediante as seguintes expressões:

Cálculo do ID dos switches de acesso (Sw Ac):

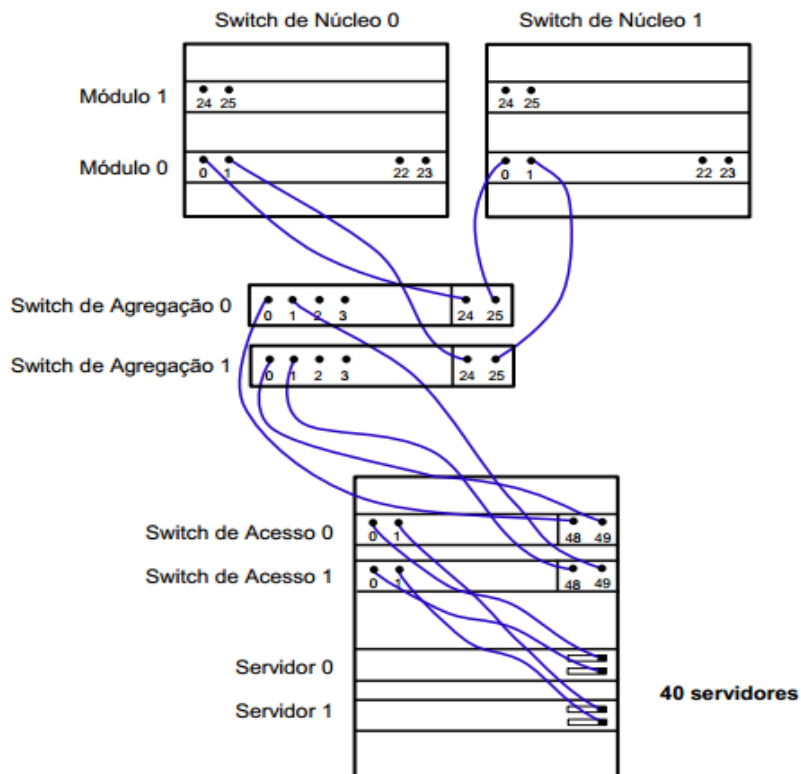
$$\begin{aligned} \text{ID } 1^\circ \text{ Sw Ac} &= \lfloor (\text{ID Serv} \div \text{Qtd Serv por Rack}) \times 2 \rfloor \\ \text{ID } 2^\circ \text{ Sw Ac} &= \text{ID } 1^\circ \text{ Sw Ac} + 1 \end{aligned}$$

Cálculo do ID das portas do switch de acesso:

- Se número de racks é igual a um:  
ID Porta Sw Ac = ID Serv
- Se número de racks é maior que um:  
ID Porta Sw Ac = (ID Host *mod* Qtd Serv por Rack)
- O ID da porta é igual para os dois switches de acesso.



Figura 7 – Identificação e interconexões dos equipamentos.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Da mesma forma, conhecendo o ID de um switch de acesso, é possível calcular o ID dos seus switches de agregação e as portas correspondentes mediante as seguintes expressões:

Cálculo do ID dos switches de agregação (Sw Agr):

$$\begin{aligned} \text{ID } 1^{\circ} \text{ Sw Agr} &= \lfloor (\text{ID Sw Ac} \div \text{Qtd Portas Sw Agr}) \times 2 \rfloor \\ \text{ID } 2^{\circ} \text{ Sw Agr} &= \text{ID } 1^{\circ} \text{ Sw Agr} + 1 \end{aligned}$$

Cálculo ID das portas do switch de agregação.

- Se a quantidade de switches de agregação é igual a dois:  

$$\text{ID Porta Sw Agr} = \text{ID Sw Ac}$$

- Se a quantidade de switches de agregação é maior que dois:  

$$\text{ID Porta Sw Agr} = \text{Id Sw Ac mod Qtd Portas Sw Agr}$$
- O ID da porta é igual para os dois switches de agregação.

Se a quantidade de Switches de Acesso é igual a dois não existem Switches de Agregação e as portas de *uplink* dos switches de acesso estão interligadas entre si.

Finalmente, conhecendo o ID de um switch de agregação, é possível calcular o ID dos seus módulos de switch de núcleo e o ID das portas dos mesmos mediante as seguintes expressões:

Cálculo ID módulo de switch de núcleo

$$\text{ID Mód Sw Nuc} = [(\text{ID Sw Agr} \div \text{Qtd Portas Mód})]$$

- Nos dois switches de núcleo o ID do módulo é igual.

Cálculo do ID das portas de módulo do switch de núcleo:

- As portas dos módulos dos switches de núcleo serão identificadas com números contíguos e crescentes independentemente do módulo, portanto:

$$\text{ID Porta Mód Sw Nuc} = \text{ID Sw Agr}$$

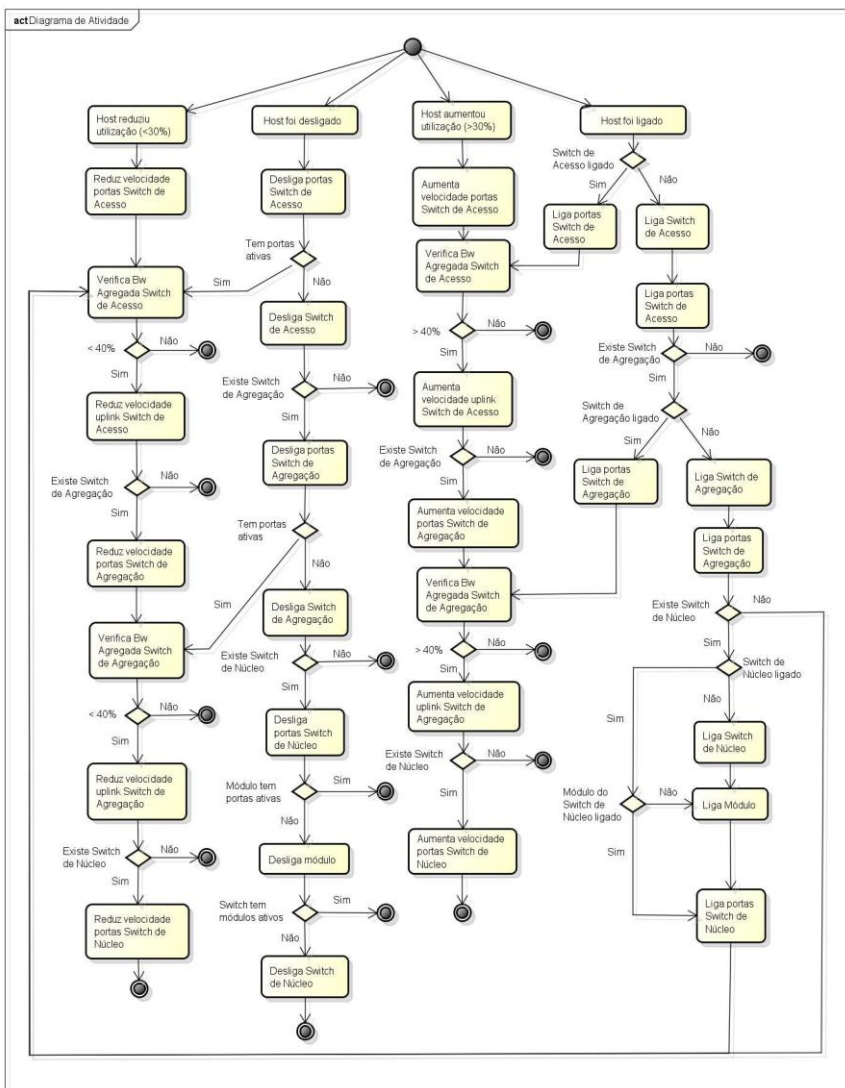
- O número da porta é igual nos dois módulos de switch de núcleo.

Se a quantidade de switches de agregação é igual a dois não existem switches de núcleo e, portanto, as portas de *uplink* dos switches de agregação estão interligadas entre si.

#### 5.1.2.4 Gerenciamento da rede

Durante a simulação, na medida em que são ligados ou desligados servidores, o simulador deve aplicar as regras de gerenciamento da rede ligando e desligando as portas correspondentes ou configurando sua velocidade. A sequência de aplicação das regras é definida no diagrama de atividades da Figura 8.

Figura 8 – Sequência de aplicação das regras do modelo.



Fonte: Villarreal, Villarreal, Westphall e Westphall, 2014.

### 5.1.3 Estudo de caso

Para verificar o modelo e determinar o potencial da proposta, o mesmo é aplicado em um caso hipotético de uma nuvem com 200 servidores físicos exemplificando duas situações possíveis na operação do sistema. Considerou-se, para este cenário, que os switches de camada de acesso têm um consumo base de 60 W e os de camada de agregação de 140 W.

Aplicando a regra para calcular a topologia verificamos que a mesma possuirá 5 racks, cada um alojando um cluster com 40 servidores e, portanto, serão 10 switches de camada de acesso com 40 portas *Gigabit Ethernet* e duas portas 10 *Gigabit Ethernet* ativas, e dois switches de camada de agregação com 10 portas 10 *Gigabit Ethernet* para os switches de camada de acesso e duas portas 40 *Gigabit Ethernet* de *uplink* para interligação entre eles.

#### 5.1.3.1 Cenário 1

Neste cenário, consideram-se todos os equipamentos com todas suas portas ligadas. Portanto, utilizando a equação (1), o consumo da rede será:

$$\begin{aligned} \text{Switches de acesso} &= 10 \times (60 + 2 \times 5 + 48 \times 0.5) \\ &= 940 \text{ W} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Switches de agregação} &= 2 \times (140 + 2 \times 10 + 24 \times 5) \\ &= 560 \text{ W} \end{aligned}$$

$$\text{Consumo Total da Rede} = 1.500 \text{ W}$$

#### 5.1.3.2 Cenário 2

Neste cenário, considera-se a configuração inicial com as portas não utilizadas desligadas. Assim, de acordo com a equação (1), o consumo da rede será:

$$\begin{aligned} \text{Switches de acesso} &= 10 \times (60 + 2 \times 5 + 40 \times 0.5) \\ &= 900 \text{ W} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Switches de agregação} &= 2 \times (140 + 2 \times 10 + 10 \times 5) \\ &= 420 \text{ W} \end{aligned}$$

$$\text{Consumo Total da Rede} = 1.320 \text{ W}$$

Nesta situação, observa-se que, apenas com a configuração inicial adequada da rede, obtemos uma economia de energia de aproximadamente 12%.

### 5.1.3.3 Cenário 3

Neste cenário, são considerados 90 Servidores ligados, com a carga de trabalho consolidada nos três primeiros racks e as regras de configuração da rede aplicadas.

Nesta situação, há 4 switches de camada de acesso trabalhando nas condições iniciais, 2 switches de camada de acesso trabalhando com 12 portas *Gigabit Ethernet* (10 para os servidores e as 2 portas de *uplink* com sua velocidade reduzida) e 2 switches de camada de agregação com 4 portas de *downlink* 10 *Gigabit Ethernet*, 2 Portas de *downlink* *Gigabit Ethernet*, e duas portas de *uplink* 40 *Gigabit Ethernet*, sendo então o consumo:

$$\begin{aligned} \text{Switches de acesso 1} &= 4 \times (60 + 2 \times 5 + 40 \times 0.5) \\ &= 360 \text{ W} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Switches de acesso 2} &= 2 \times (60 + 12 \times 0.5) \\ &= 132 \text{ W} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Switches de agregação} &= 2 \times (140 + 2 \times 10 + 4 \times 5 + 2 \times 0.5) \\ &= 362 \text{ W} \end{aligned}$$

$$\text{Consumo Total da Rede} = 854 \text{ W}$$

Neste cenário, observa-se uma economia de aproximadamente 44%.

## 5.2 DESENVOLVIMENTO DAS EXTENSÕES AO CLOUDSIM

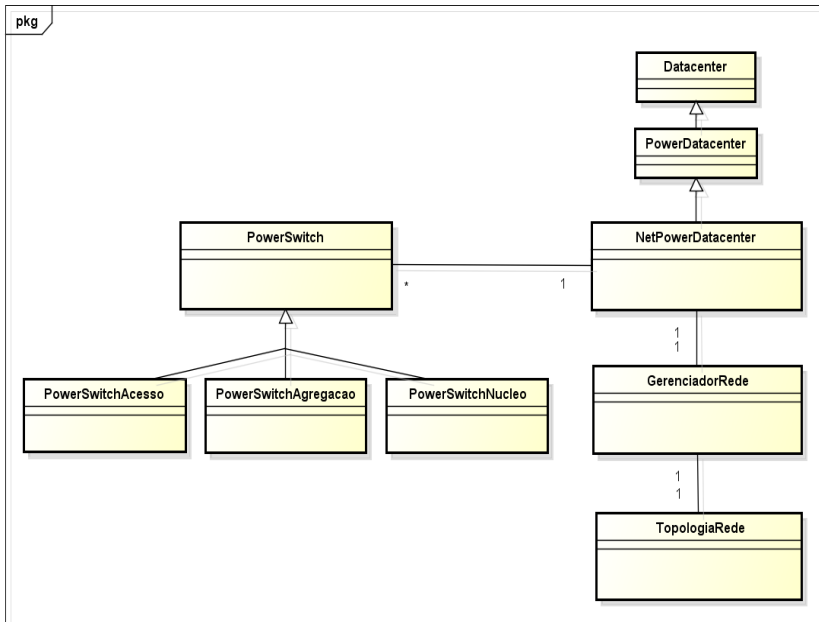
Para implementar o modelo de simulação proposto na seção anterior, foram desenvolvidas extensões ao CloudSim e o simulador estendido foi chamado NetPowerCloudsim (VILLARREAL, 2013).

Estas extensões permitem modelar a rede de acordo com a topologia padrão definida, gerenciar a mesma em função das regras estabelecidas no modelo e calcular a energia consumida durante sua operação.

### 5.2.1 NetPowerCloudSim

Para representar a rede e gerenciá-la de acordo com as regras do modelo, foram desenvolvidas as classes *PowerSwitch*, *TopologiaRede*, *GerenciadorRede* e *NetPowerDatacenter*, como apresentado no diagrama de classes simplificado da Figura 9.

Figura 9 – Diagrama de Classes simplificado do NetPowerCloudSim.



Fonte: Villarreal, 2013.

A classe *PowerSwitch* representa um equipamento de rede e é estendida por outras classes que representam switches de camadas específicas (acesso, agregação e núcleo) cada um com suas próprias características. Os switches têm atributos como status (ligado e desligado), consumo com a configuração atual, quantidade de portas e velocidade de cada porta; e métodos que permitem ligá-los e desligá-los, configurar a velocidade de uma porta específica e calcular seu consumo em determinado momento, bem como a energia consumida durante um frame da simulação.

A classe *TopologiaRede* representa a topologia da rede do *data center* e é responsável por calcular a quantidade de cada tipo de switch e suas interconexões. Antes do início da simulação, baseando-se na quantidade de máquinas físicas, esta classe calcula o número de racks necessários para acomodá-las. As quantidades de switches de acesso, agregação e núcleo são então calculadas a partir da quantidade de racks. Esta classe possui também os métodos para calcular as interconexões entre equipamentos de rede e servidores.

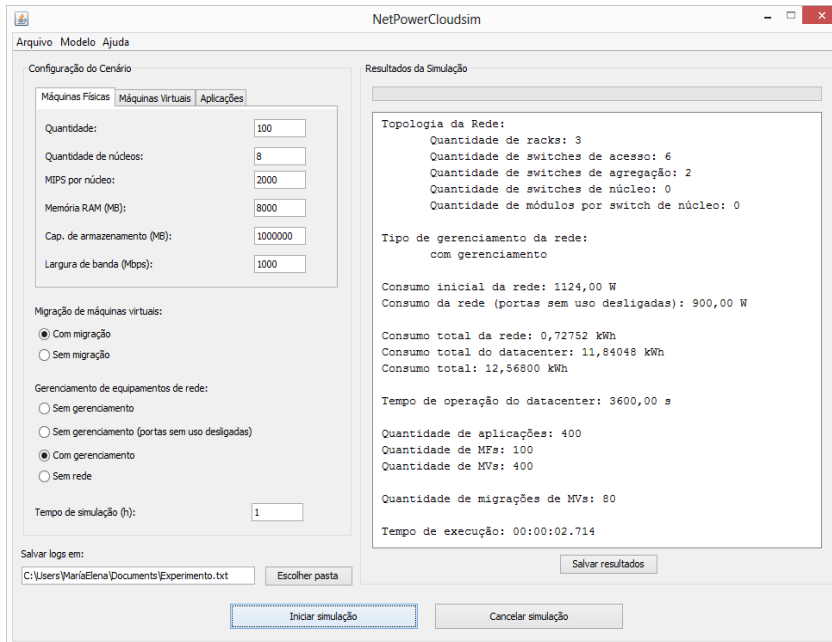
A classe *GerenciadorRede* contém os atributos e a lógica requeridos para ligar e desligar equipamentos de rede e portas, e para configurar a velocidade das portas quando o estado dos servidores muda, baseado nas regras e crenças do modelo de gerenciamento. Antes do início da simulação, com auxílio da classe *TopologiaRede*, o gerenciador determina quais portas não possuem conexões a outros equipamentos e as desliga. Então, verifica se a largura de banda agregada dos switches que tiveram portas desligadas está abaixo de um limiar pré-definido para determinar se a velocidade de suas portas de *uplink* deve ser reduzida. Também verifica se o equipamento tem todas as portas desligadas e em esse caso o desliga.

Finalmente, a classe *PowerDatacenter* foi estendida pela classe *NetPowerDatacenter* para integrar o modelo de rede ao CloudSim, permitindo interação com os eventos gerados por outras entidades do simulador. Esta classe representa um *data center* com uma rede composta por máquinas físicas e switches de acesso, agregação e núcleo; e calcula seu consumo durante a simulação. Assim, em cada frame da simulação, esta classe calcula o consumo de energia da rede, adiciona este valor ao consumo total do *data center* e informa as mudanças de estado dos servidores ao gerenciador da rede para que este possa reconfigurar os equipamentos de rede de acordo com as regras.

Para executar os experimentos, foi implementada uma classe principal, responsável por criar o cenário, iniciar a simulação e apresentar os resultados. Esta classe permite configurar as características de todos os objetos necessários e os parâmetros da simulação.

A fim de facilitar as simulações e de poder utilizar o simulador com fins didáticos, foi desenvolvida uma interface gráfica que permite configurar o cenário e repetir simulações com diferentes parâmetros sem necessidade de modificar o código-fonte. Esta interface é mostrada na Figura 10.

Figura 10 – Interface gráfica do NetPowerCloudSim.



Fonte: Villarreal, 2013.

A versão utilizada para realizar as extensões foi o CloudSim 3.0.3 e a implementação foi feita com a linguagem de programação Java através do ambiente de desenvolvimento Netbeans IDE 7.3.1 em conjunto com a biblioteca gráfica Swing. Para verificar a correção do código de cada classe, foram realizados testes de unidade através do *framework* JUnit. Os testes de integração foram executados com o auxílio de uma classe desenvolvida para tal fim e através de simulações simples que permitiram analisar meticulosamente os logs e comparar os resultados obtidos com os esperados.

Por fim, com o objetivo de auxiliar na compreensão do código e da operação dos algoritmos, bem como facilitar futuras extensões, todas as classes criadas foram amplamente comentadas e foi gerada a documentação com a ferramenta Javadoc, fornecida pela Sun Microsystems.



## 5.3 VERIFICAÇÃO DO MODELO

Nesta seção são apresentados três dos experimentos realizados para validar o modelo e a discussão dos resultados.

### 5.3.1 Experimentos e Resultados

Os experimentos apresentados a seguir consistiram em três simulações de cenários diferentes executadas em um microcomputador com as seguintes características: processador Intel Core i5-3230M 2.6 GHz; memória RAM DDR3 de 8GB; e sistema operacional Windows 8 64 bits.

Os três cenários criados para os experimentos tiveram os seguintes parâmetros em comum: um *data center*; máquinas físicas com oito núcleos de processamento de 2000 MIPS, memória RAM de 8 GB, capacidade de armazenamento de 1 TB e largura de banda de 1 Gbps; máquinas virtuais com dois núcleos de processamento de 1000 MIPS, memória RAM de 1 GB e largura de banda de 100 Mbps.

Os experimentos realizados e os resultados obtidos são descritos e discutidos a seguir.

#### 5.3.1.1 Experimento 1

Neste experimento, foi simulado um *data center* com apenas 2 máquinas físicas, 4 máquinas virtuais e 4 aplicações, operando durante 1 hora, com a finalidade de verificar o correto funcionamento das extensões e sua interação com o CloudSim.

A simulação foi repetida quatro vezes: a primeira com a versão original do CloudSim; a segunda com o NetPowerCloudSim sem representar a rede; a terceira com representação da rede, mas sem gerenciamento; e a última com rede gerenciada. Os resultados e os logs de cada simulação foram comparados entre si e com os resultados esperados, e foram realizados os ajustes necessários para garantir a correção e a coerência do modelo.

Este experimento permitiu avaliar todas as funcionalidades das extensões desenvolvidas, uma vez que, apesar da simplicidade do cenário, acontecem migrações de máquinas virtuais, desligamentos de MFs, reduções e aumentos das taxas de utilização de MFs, e, conseqüentemente, configurações de velocidade e desligamentos de portas de equipamentos de rede.

A Tabela 4 apresenta os resultados desta simulação. Pode-se observar que, como esperado, o consumo do *data center* se manteve constante em todas as repetições da simulação e o consumo da rede foi maior quando não gerenciada. Observa-se também que o consumo da rede possui valor muito próximo ao do consumo do *data center*. Isto acontece porque foi montado um rack com dois switches de acesso para apenas duas máquinas físicas, o que, na prática, não aconteceria.

Tabela 4 – Resultados do Experimento 1.

	Repetições da simulação			
	$R_1$	$R_2$	$R_3$	$R_4$
Tempo de execução (ms)	69	67	77	109
Consumo inicial da rede (W)	-	-	188	124
Consumo do <i>data center</i> (kWh)	0,1304	0,1304	0,1304	0,1304
Consumo da rede (kWh)	-	-	0,1723	0,1076
Consumo total (kWh)	0,1304	0,1304	0,3027	0,2380
Número de migrações de MVs	2	2	2	2
Número de desligamentos de MFs	1	1	1	1

Fonte: Villarreal, Villarreal, Westphall e Westphall, 2014.

### 5.3.1.2 Experimento 2

Neste experimento, foram simuladas seis horas de operação de um *data center* com 500 MFs, para que a rede fosse composta pelas três camadas da topologia. Foram executadas 2.000 MVs e 2.000 aplicações, de forma que houvesse uma quantidade considerável de migrações de máquinas virtuais e desligamentos de máquinas físicas.

A simulação foi repetida três vezes: a primeira sem gerenciamento da rede; a segunda sem gerenciamento, mas desligando as portas sem uso na configuração inicial; e a última com gerenciamento da rede.

Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 5, no qual se observa que:

- O consumo da rede sem gerenciamento foi de 32,210 kWh;
- Ao desligar as portas sem uso na configuração inicial, houve uma economia de 4,402 kWh (13,66%);
- Com gerenciamento dos equipamentos de rede, a economia foi de 6,846 kWh (21,25%);
- Considerado o consumo total do *data center* (401,616 kWh), a economia com as portas sem uso desligadas foi de 1,09% e com gerenciamento da rede foi de 1,70%.

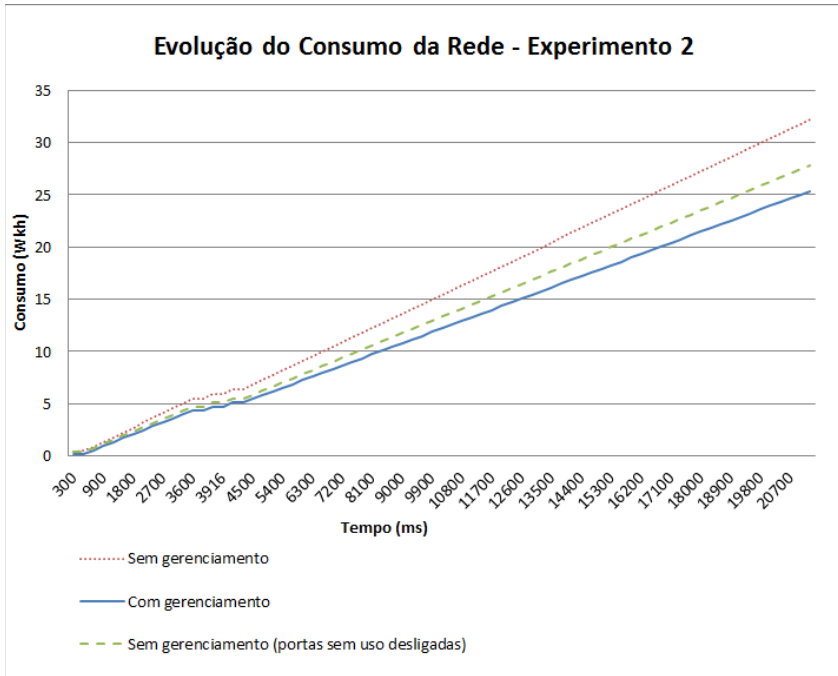
Tabela 5 – Resultados do Experimento 2.

	Repetições da simulação		
	$R_1$	$R_2$	$R_3$
Tempo de execução (ms)	00:02:32.565	00:02:33.359	00:02:37.299
Consumo inicial da rede (W)	5.444,00	4.700,00	4.700,00
Consumo do <i>data center</i> (kWh)	369,4057	369,4057	369,4057
Consumo da rede (kWh)	32,2104	27,8084	25,3643
Consumo total (kWh)	401,6161	397,2141	394,7700
Número de migrações de MVs	1.268	1.268	1.268
Número de desligamentos de MFs	250	250	250

Fonte: Villarreal, Villarreal, Westphall e Westphall, 2014.

O gráfico da Figura 11 mostra a evolução do consumo da rede durante as 6 horas de operação do *data center*, representando o valor acumulado do consumo em kWh ao final de cada frame da simulação.

Figura 11 – Evolução do consumo da rede no Experimento 2.



Fonte: Villarreal, Villarreal, Westphall e Westphall, 2014.

### 5.3.1.3 Experimento 3

Neste experimento, foram simuladas seis horas de operação de um *data center* composto por 5.760 máquinas físicas, 10.000 máquinas virtuais e 10.000 aplicações, com o objetivo de mostrar o funcionamento do simulador representando um *data center* de grande porte e verificar a eficiência do código implementado.

Assim como no Experimento 2, a simulação foi repetida três vezes: a primeira sem gerenciamento de rede; a segunda sem gerenciamento, mas desligando as portas sem uso na configuração inicial; e a última com gerenciamento da rede.

A partir dos resultados deste experimento, apresentados na Tabela 6, é possível observar que:

- O consumo da rede sem gerenciamento foi de 211,060 kWh;
- Desligando as portas sem uso na configuração inicial, houve uma economia de 6,816 kWh (3,23%);
- Com gerenciamento dos equipamentos de rede, a economia foi de 97,919 kWh (46,39%);
- Considerando o consumo total do *data center* (2.071,772 kWh), a economia com as portas sem uso desligadas foi de 0,33% e com gerenciamento da rede, de 4,73%.

Observa-se ainda que o tempo de execução da simulação com gerenciamento da rede foi de aproximadamente 27 minutos, confirmando que é possível simular horas de funcionamento de um *data center* de grande porte em um computador de recursos padrão e que as extensões não afetam a eficiência do simulador.

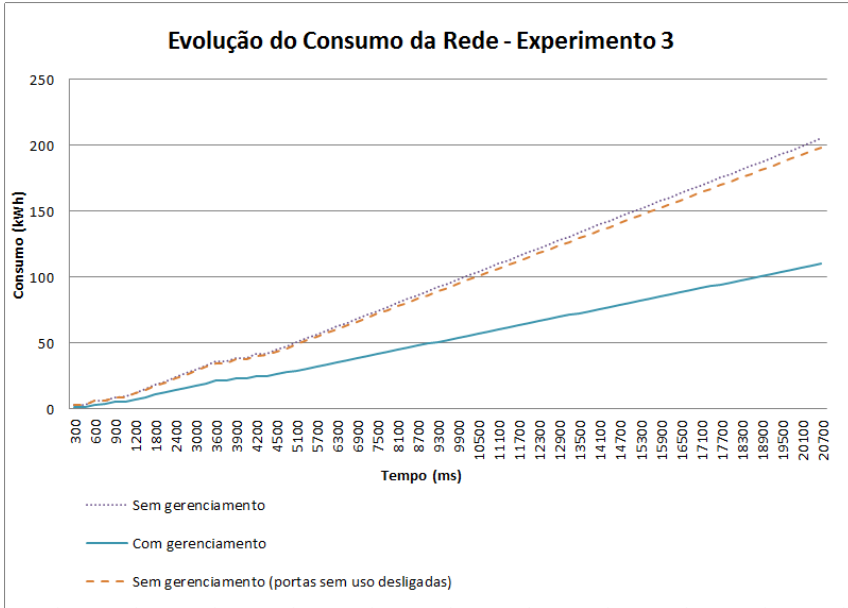
Tabela 6 – Resultados do Experimento 3.

	Repetições da simulação		
	$R_1$	$R_2$	$R_3$
Tempo de execução (ms)	00:24:49.597	00:25:28.382	00:27:09.126
Consumo inicial da rede (W)	35.672,00	34.520,00	34.520,00
Consumo do <i>data center</i> (kWh)	1.860,7119	1.860,7119	1.860,7119
Consumo da rede (kWh)	211,0603	204,2442	113,1412
Consumo total (kWh)	2.071,7722	2.064,9562	1.973,8531
Número de migrações de MVs	12.177	12.177	12.177
Número de desligamentos de MFs	4.510	4.510	4.510

Fonte: Villarreal, Villarreal, Westphall e Westphall, 2014.

O gráfico da Figura 12 mostra a evolução do consumo da rede durante a operação do *data center*.

Figura 12 – Evolução do consumo da rede no Experimento 3.



Fonte: Villarreal, Villarreal, Westphall e Westphall, 2014.

### 5.3.2 Discussão dos Resultados

A partir dos resultados obtidos nos experimentos apresentados, podem-se fazer as seguintes considerações:

- Com equipamentos de rede legados e sem o gerenciamento proposto, o consumo da rede pode representar 10% do consumo do *data center*;
- Mediante a aplicação do modelo nos cenários propostos, que correspondem a cenários típicos, é possível reduzir o consumo da rede em aproximadamente 50%;

- Da mesma forma, é possível obter uma economia de energia de aproximadamente 5% no consumo total do *data center*;
- O impacto real da aplicação do modelo será diferente em cada caso particular e dependerá principalmente da configuração do *data center*, sendo mais expressivo em instalações com alto grau de sobredimensionamento, com equipamentos pouco eficientes, ou em períodos de baixa utilização;
- Nos cenários apresentados considerou-se o consumo médio de equipamentos de rede atuais, sendo que equipamentos das primeiras gerações de cada tecnologia podem ter um consumo até 300% maior;
- O modelo de gerenciamento de rede proposto pode ser integrado com qualquer abordagem de gerenciamento de nuvem verde sem necessidade de alterações na mesma, no entanto, será mais efetivo se o gerenciador da nuvem considerar as necessidades de consolidação de tráfego da rede na sua política de alocação de máquinas virtuais;
- A aplicação do modelo não afeta a confiabilidade da rede, visto que somente são desligados os links ou equipamentos quando os servidores que atendem são desligados, mantendo-se sempre a redundância para os equipamentos ativos.

Deve-se, também, considerar as seguintes limitações da pesquisa e simplificações do modelo:

- Visto que somente são desligadas portas de switch quando é desligado o servidor correspondente, não foram considerados possíveis impactos da aplicação do modelo no desempenho do sistema, assumindo que em todos os casos colocar em funcionamento portas ou equipamentos de rede desligados leva menos tempo que ligar os servidores físicos;

- A rede de armazenamento SAN (*Storage Area Network*) do *data center* não foi considerada na proposta, porém é possível aplicar o modelo com as mesmas regras que foram aplicadas à LAN, sendo necessário verificar as crenças aplicáveis e o impacto da sua aplicação, que contribuiria para uma maior economia de energia no *data center*;
- As experiências foram realizadas com as cargas e políticas de alocação de máquinas virtuais padrão do CloudSim, que representam a situação típica de um *data center*. Novas extensões ao simulador devem ser feitas para modelar as políticas de alocação e algoritmos baseados em regras do OTM;
- O impacto da aplicação do modelo não será tão expressivo se os equipamentos de rede incorporam técnicas de *Green Networking*, porém ainda será conveniente. Para analisar esta situação e dimensionar a conveniência, o modelo deverá ser ampliado para representar equipamentos com diferentes graus de proporcionalidade no seu consumo de energia.

As experiências permitiram, ainda, as seguintes constatações:

- A interface gráfica demonstrou ser uma ferramenta útil para determinar o impacto no consumo da rede de medidas como atualização de *firmware*, utilização de portas e cabeamento óptico, ou troca de equipamentos por outros mais eficientes, podendo ser utilizada para determinar a conveniência econômica de investimentos na melhoria da infraestrutura;
- Esta interface mostrou, também, ser útil como recurso didático para o entendimento da estrutura e do funcionamento do *data center*, da topologia da sua rede e para sensibilizar sobre a importância e impacto das boas práticas de gerenciamento de rede no consumo da rede e do *data center*.



## 6 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Nesta dissertação, foram inicialmente apresentados conceitos básicos referentes a *Green IT*, *Green Cloud* e *Green Networking*, que demonstram a necessidade de considerar os equipamentos de rede nas estratégias destinadas a tornar mais eficientes os *data centers*, já que a rede representa uma porcentagem significativa do consumo total, e quanto mais eficiente ser tornam os outros componentes, mais expressiva é esta participação.

Posteriormente, na seção de trabalhos correlatos, foram apresentados um modelo de gerenciamento de nuvem verde baseado na teoria da organização e chamado OTM e conceitos de gerenciamento de equipamentos de rede que, devidamente aplicados, fazem com que o comportamento do consumo total da rede seja aproximadamente proporcional à carga de tráfego, ainda quando utilizados equipamentos legados cujo consumo de energia tende a ser constante e independente do volume de tráfego. A proposta foi criar um modelo de gerenciamento de rede para ampliar o OTM com a finalidade de gerenciar também a consolidação do tráfego de rede conforme estes princípios de gerenciamento.

Foram descritos então, os elementos que devem ser acrescentados à arquitetura do OTM, incluindo as regras e as crenças necessárias para a correta configuração da rede em função das mudanças de estado dos servidores durante o processo de consolidação de carga.

Também foi apresentado um modelo para simular e verificar as extensões propostas ao OTM. Este modelo determina a topologia da rede do *data center* em função do número de servidores físicos, as regras para configurar e gerenciar a rede de acordo com as mudanças de estado dos servidores físicos, e as fórmulas para o cálculo do consumo dos switches e da rede completa.

Este modelo é a base para a criação de um simulador para medir o impacto da aplicação da abordagem proposta em diferentes cenários, e foi validado mediante sua aplicação em um estudo de caso realizado em forma analítica, que permitiu verificar que as fórmulas e regras são corretas e suficientes para criar e gerenciar a topologia da rede e para calcular o consumo da rede em cada passo da simulação. Este estudo permitiu, também, evidenciar os possíveis efeitos da aplicação do modelo na eficiência do *data center*.

Posteriormente, foi apresentado o simulador que foi criado estendendo o CloudSim e foi chamado NetPowerCloudSim. As extensões incluem novas classes para determinar a topologia da rede, para representar os equipamentos de rede e seu consumo de energia, e para gerenciar a rede aplicando as regras durante a simulação conforme as mudanças de estado das máquinas físicas. Também foi estendida a classe *Datacenter* do CloudSim de forma que o modelo da rede interage com o núcleo do simulador respondendo aos eventos do *data center* e integrando o consumo da rede com o consumo total do *data center*.

Foi desenvolvida ainda uma interface gráfica para o simulador com a finalidade de permitir a criação de cenários e realizar simulações sem necessidade de conhecer e modificar o código fonte do CloudSim. Além de facilitar a realização dos experimentos, esta interface mostrou ser útil como recurso didático para o entendimento da estrutura e funcionamento do *data center*, e para sensibilizar sobre a importância do correto gerenciamento da energia neste ambiente.

Finalmente, foram apresentados três dos experimentos que foram realizados para verificar o modelo, demonstrando que é possível obter ganhos significativos no consumo elétrico do *data center* mediante a aplicação da abordagem proposta. Foi assim demonstrada a possibilidade e a conveniência de estender o modelo de gerenciamento de nuvem verde, conforme proposto, e verificada a hipótese deste trabalho.

## 6.1 PRINCIPAIS CONTRIBUIÇÕES

A principal contribuição deste trabalho é fornecer um modelo de gerenciamento dos equipamentos de rede do *data center* para otimizar a abordagem de nuvem verde e a extensão do CloudSim para representar os equipamentos de rede e o seu consumo de energia. Esta extensão foi desenvolvida para verificar o impacto da aplicação do modelo, mas pode ser utilizada para diversos fins, como avaliar o efeito da aplicação de técnicas estáticas à rede do *data center* e pode, também, ser empregada como recurso de apoio didático.

Embora os resultados reais em cada situação dependam da configuração do *data center*, do tipo de equipamentos de rede e das cargas de trabalho, foi mostrado que é possível obter uma economia de aproximadamente 50% no consumo de energia da rede e de aproximadamente 5% no consumo total do *data center* em cenários que representam a realidade dos *data centers* atuais.

## 6.2 TRABALHOS FUTUROS

Como trabalhos futuros, se propõe continuar esta pesquisa com a realização de novos experimentos para determinar a contribuição da aplicação do modelo em cenários com diferentes configurações e cargas de trabalhos baseadas em situações reais, assim como para determinar as regras e políticas de alocação de máquinas virtuais mais eficientes em cada caso. Propõe-se, ademais, comparar os resultados destes experimentos com os obtidos em cenários reais para calibrar o simulador.

Finalmente, se propõe continuar a pesquisa com a proposta de implementação do modelo mediante a aplicação dos novos padrões para *data centers* como SDN (*Software Defined Network*) e Open Flow. Visto que o desempenho do sistema pode ser afetado se o custo de ativação dos equipamentos de rede for maior que o dos servidores, sugere-se também, o estudo da correta configuração da rede e das tecnologias apropriadas para evitar esta situação, com especial atenção aos protocolos de gerenciamento da redundância e de agregação de links.



## REFERÊNCIAS

- ABDULLAH, A. Green Cloud Computing: The Need of the Hour. *International Journal of Research in Advent Technology*, v. 2, n. 1, p. 316-321, jan. 2014.
- ACPI. Advanced configuration and power interface specification. Hewlett-Packard, Intel, Microsoft, Phoenix, Toshiba, 2013. Disponível em: <<http://www.acpi.info/downloads/acpispec40a.pdf>>. Acesso em: out. 2014.
- ALBERS, S. Energy efficient algorithm. *Communications of the ACM*, v. 53, n. 5, p. 86-96, mai. 2010.
- AMAZON. Amazon elastic compute cloud (Amazon EC2). Seattle: Amazon, 2014. Disponível em: <<http://aws.amazon.com/ec2/>>. Acesso em: out. 2014.
- BALIGA, J. et al. Green cloud computing: balancing energy in processing, storage, and transport. *IEEE*, v. 99, n. 1, p. 149-167, jan. 2011.
- BELOGLAZOV, A. et al. A taxonomy and Survey of Energy-efficient Data centers and Cloud Computing. *Advances in Computers*, v. 82, p. 47-111, nov. 2011.
- BELOGLAZOV, A. **Energy-Efficient Management of Virtual Machines in Data Centers for Cloud Computing**. Melbourne, 2013. 235 f. Tese (Doutorado em Ciência da Computação). Universidade de Melbourne.
- BIANZINO, A. et al. A survey of Green Networking research. *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, v. 14, p. 3-20, fev. 2012.
- BLANQUICET, F.; CHRISTENSEN, K. Managing energy use in a network with a new SNMP power state MIB. In: IEEE CONFERENCE ON LOCAL COMPUTER NETWORKS LCN, 33., out. 2008. Montreal. Anais... 2008, p. 509-511.

BOLLA, R. et al. Energy efficiency in the future internet: a survey of existing approaches and trends in energy-aware fixed network infrastructures. *Communications Surveys & Tutorials IEEE*, v. 13, n. 2, p. 223-244, mai. 2011.

BUYYA, R.; YEO, C. S.; VENUGOPAL, S. Market-oriented cloud computing: vision, hype, and reality for delivering it services as computing utilities. In: *IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON HIGH PERFORMANCE COMPUTING AND COMMUNICATIONS*, 10., set. 2008. Dalian. Anais... 2008, p. 5-13.

CALHEIROS, R. et al. CloudSim: A Toolkit for Modeling and Simulation of Cloud Computing Environments and Evaluation of Resources Provisioning Algorithms. *SPE Wiley Press*, v. 41, p. 23-50, jan 2011.

CHAVES, S. A.; URIARTE, R. B.; WESTPHALL, C. B. Toward an architecture for monitoring private clouds. *IEEE Communications Magazine*, v. 49, n. 12, p. 130-137, dez. 2011.

CHRISTENSEN, K. et al. IEEE 802.3az: The road to Energy Efficient Ethernet. *IEEE Communication Magazine*, v. 48, p. 50-56, nov. 2010.

DE CUSATIS, C. S.; CARRANZA, A.; DE CUSATIS, C. Communication within clouds: open standards and proprietary protocols for data center networking. *IEEE Communication Magazine*, v. 50, p. 26-33, set. 2012.

D-LINK. Green Technologies. Taipei: D-LINK, 2014. Disponível em: <<http://www.dlinkgreen.com/energyefficiency.asp>>. Acesso em: out. 2014.

ENERGY STAR. History of Energy Star. Washington: EPA, 2014. Disponível em: <<http://http://www.energystar.gov/about/history>>. Acesso em: out. 2014.

FACEBOOK. Lulea goes live. Lulea: Facebook Inc., 2013. Disponível em: <<https://www.facebook.com/notes/lulea-data-center/lulea-goes-live/474321655969861>>. Acesso em: out. 2014.

FENG-SEN, C.; KWANG-CHENG, C.; CHEN-MOU, C. Toward green cloud computing. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON UBIQUITOUS INFORMATION MANAGEMENT AND COMMUNICATION, 5., 2011. Nova York. Anais... fev. 2011.

FREITAS, R. **Uso eficiente de energia para cloud computing através de simulações**. 2011. Monografia (Bacharelado em Ciências da Computação). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

GARG, S. K.; BUYYA, R. Green cloud computing and environmental sustainability. In: MURUGESAN, S.; GANGADHARAN, G. **Harnessing green IT: principles and practices**. Oxford: Wiley Press, 2012.

GOOGLE. Google Apps for business. Mountain View: Google Inc., 2014. Disponível em: <<http://www.google.com/enterprise/apps/business>>. Acesso em: out. 2014.

GOOGLE. Eficiência: como fazemos isso. Mountain View: Google Inc., 2012. Disponível em: <<http://www.google.com/about/datacenters/efficiency/internal/index.html#measuring-efficiency>>. Acesso em: out. 2014.

IEEE p802.3az Energy efficient ethernet task force. New York: IEEE, 2010. Disponível em: <<http://www.ieee802.org/3/az/>>. Acesso em: out. 2014.

JING, S. et al. State-of-the-art Research Study for Green Cloud Computing. *The Journal of Supercomputing*, v. 65, n. 1, p. 445-468, jul. 2013.

KUMAR, R.; MIERITZ, L. **Conceptualizing “green IT” and data center power and cooling issues**. Gartner Research Paper, 2007.

LIU, Y. et al. **Data Center Networks: topologies, architectures and fault-tolerance characteristics**. Nova York: Springer, 2013.

MAHADEVAN, P. et al. A Power Benchmarking Framework for Network Devices. *Proc. 8th International IFIP-TC 6 Networking Conference*, p. 795-808, nov. 2009.

MAHADEVAN, P. et al. On energy efficiency for enterprise and data center networks. *IEEE Communication Magazine*, v. 49, p. 94-100, ago. 2011.

MELL, P.; GRANCE, T. The NIST definition of cloud computing (draft). **NIST special publication**, v. 800, p. 145, 2011.

MICROSOFT. Windows Azure. Redmond, 2014. Disponível em: <<http://azure.microsoft.com/pt-br/>>. Acesso em: out. 2014.

MINAS, L.; ELLISON, B. **Energy efficiency for information technology**: how to reduce power consumption in server and data center. Intel Press, 2009.

MURUGESAN, S.; LAPLANTE, P. IT for a greener planet, *IEEE Computer Society IT Professional*, v. 13, n. 1, p. 16-18, jan. 2011.

NATHUJI, R.; SHWAN, K. Virtualpower: coordinated power management in virtualized enterprise systems. *ACM SIGOPS Operating System Review*, v. 41, n. 6, p. 265-278, dez. 2007.

PETTEY, C. Gartner estimates ICT industry accounts for 2 percent of global CO2 emissions. Stanford: Gartner Group, 2007. Disponível em: <<http://www.gartner.com/newsroom/id/503867>>. Acesso em: out. 2014.

ROCHWERGER, B. et al. **Cloud computing principles and paradigms**. New Jersey: Wiley Press, 2011.

SRIKANTAIAH, S.; KANSAL, A.; ZHAO, F. Energy aware consolidation for cloud computing. In: CONFERENCE ON POWER AWARE COMPUTING AND SYSTEMS, 8.. 2008. Berkeley. Anais... Berkeley: USENIX Association, 2008.

VILLARREAL, M. E. **NetPowerCloudSim**: Extensão do CloudSim para Validação de um Modelo de Gerenciamento de Equipamentos de Rede Legados em Nuvem Verde. 2013. Monografia (Bacharelado em Ciência da Computação). Instituto Federal Catarinense, Rio do Sul.

VILLARREAL, S. R.; WESTPHALL, C. B.; WESTPHALL, C. M. Optimizing Green Clouds through Legacy Network Infrastructure



Management. In: Thirteenth International Conference on Networks (ICN), 2014, Nice (França), IARIA XPS Press, p. 142-147.

VILLARREAL, S. R.; VILLARREAL, M. E.; WESTPHALL, C. B.; WESTPHALL, C. M. Legacy Network Infrastructure Management Model for Green Cloud Validated Through Simulations. *International Journal On Advances in Intelligent Systems*, v. 7 n. 3&4, dez. 2014.

VOORSLUYS, W.; BROBERG, J.; BUYYA, R. Introducing to cloud computing. In: BUYYA, Rajkumar; BROBERG, James; GOSCINSKY, Andrzej. **Cloud computing principles and paradigms**. New Jersey: Wiley Press, 2011.

WERNER, J. **Uma Abordagem para Alocação de Máquinas Virtuais em Ambientes de Computação em Nuvem Verde**. 2011. Dissertação (Mestrado em Ciências da Computação). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

WERNER, J.; GERONIMO, G. A.; WESTPHAL, C. B.; KOCH, F.; FREITAS, R. Simulator improvements to validate the green cloud computing approach. In: LATIN AMERICAN NETWORK OPERATIONS AND MANAGEMENT SYMPOSIUM, out. 2011. Quito. Anais... 2011, p. 1-8.

WESTPHALL, C. B.; WESTPHALL, C. M.; VILLARREAL, S. R.; GERONIMO, G. A.; WERNER, J. Green Clouds through Servers, Virtual Machines and Network Infrastructure Management. In: Org: FRAGA, J. S.; SIQUEIRA, F.; MAZIERO, C. A. *Minicursos / XXXII Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos*. Porto Alegre: Sociedade Brasileira de Computação, 2014, v. 1, p. 244-289.

WESTPHALL, C. B.; VILLARREAL, S. R. Princípios e Tendências em Green Cloud Computing. *Revista Eletrônica de Sistemas de Informação*, v. 12, n. 1, p. 1-19, jan. 2013.