

---

Daniel Scheidemantel Camargo

*SENSORIAMENTO E AUTOMAÇÃO CLIMÁTICA EM  
SALA DE SERVIDORES UTILIZANDO SOFTWARE E  
HARDWARE LIVRE*

Joinville

2016

**UNIVERSIDADE DO ESTADO DE SANTA CATARINA**  
**BACHARELADO EM CIÊNCIA DA COMPUTAÇÃO**

**Daniel Scheidemantel Camargo**

**SENSORIAMENTO E AUTOMAÇÃO CLIMÁTICA EM SALA DE  
SERVIDORES UTILIZANDO SOFTWARE E HARDWARE LIVRE**

Trabalho de conclusão de curso submetido à Universidade do Estado de Santa Catarina como parte dos requisitos para a obtenção do grau de Bacharel em Ciência da Computação

**Charles Christian Miers**  
**Orientador**

Joinville, Junho de 2016

# **SENSORIAMENTO E AUTOMAÇÃO CLIMÁTICA EM SALA DE SERVIDORES UTILIZANDO SOFTWARE E HARDWARE LIVRE**

Daniel Scheidemantel Camargo

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para a obtenção do título de Bacharel em Ciência da Computação e aprovado em sua forma final pelo Curso de Ciência da Computação Integral do CCT/UDESC.

Banca Examinadora

---

Charles Christian Miers - Doutor (orientador)

---

Gilmário Barbosa dos Santos - Doutor

---

Edino Mariano Lopes Fernandes - Mestre

## **Agradecimentos**

Primeiramente agradeço à Deus por todas as bênçãos de minha vida. Dedico este trabalho aos meus pais Arnaldo e Sônia e à minha esposa Mariela, pois sem o apoio dado seria impossível concluir este trabalho. Agradeço ao meu orientador e professor, Dr. Charles Christian Miers, pelos ensinamentos, dedicação e paciência, itens indispensáveis para a realização deste projeto. Obrigado à todas as pessoas que contribuíram para meu sucesso e para meu crescimento como pessoa. Sou o resultado da confiança e da força de cada um de vocês.

*“Que os vossos esforços desafiem as impossibilidades, lembrai-vos de que as grandes coisas do homem foram conquistadas do que parecia impossível.”*

*Charles Chaplin*

## Resumo

Várias organizações realizam a execução dos seus sistemas e serviços de processamento de dados em centros de processamentos locais, *i.e.*, Data Centers (DC). Contudo, usualmente, as organizações de pequeno a médio porte não possuem condições técnicas e financeiras de monitorar as condições ambientais destes DCs e . Esse fato pode implicar desde gastos excessivos com energia até a redução drástica da vida útil dos sistemas computacionais. O presente trabalho apresenta a solução GreenHop, que realiza o monitoramento do consumo de energia elétrica e ambiental (*i.e.*, temperatura, umidade e ponto de orvalho) da sala de servidores do DC, provendo indicadores de eficiência energética por meio de métricas para DCs (ex: *Power Usage Effectiveness* (PUE)). A solução é aplicada em um estudo de caso real, no laboratório LabP2D da UDESC, mostrando que a temperatura ideal para a operação de dados nesse ambiente é de 23°C . Os resultados mostram uma redução de consumo de energia em 53,9% apenas no equipamento de refrigeração, quando comparado à temperatura de 18°C mantida anteriormente ao GreenHop. Adotar a temperatura de 23°C como novo padrão de operação resultou em uma redução do PUE de 2,34 para 1,71 pontos. O GreenHop baseia-se em soluções de hardware e software abertos (*Open Source* e *Open Hardware*). A abordagem de usar hardware e software abertos possibilita a sua implantação de forma facilitada e independente de fornecedores, ao mesmo tempo que torna a solução de acordo com as necessidade de cada organização. Assim, o objetivo é fornecer uma solução de monitoramento energético e ambiental para sala de servidores de DCs, através de um sistema personalizável de fácil aplicação e replicação.

**Palavras-chave:** *Data Centers*, Monitoramento, Código Aberto, Eficiência Energética

## Abstract

Several organizations carry out the execution of their systems and data processing services in local processing centers, *i.e.*, data centers (DC). However, usually, the micro to medium-sized organizations do not have technical and financial conditions to monitor the environmental conditions of their DC. Thus, this may imply from excessive energy costs to drastic reduction of the lifespan of the equipment. In this paper we present the solution GreenHop that aims to perform energy and environmental (temperature, humidity and dew point) monitoring of the DC server room, providing energy efficiency indicators through green metrics for DCs (*e.g.*, Power Usage Effectiveness (PUE)). The solution is applied in a real case study in LabP2D laboratory at UDESC, showing that the ideal temperature for the data operation in this environment is 23°C. The results show a power consumption reduction by 53.9% only on the cooling equipment, when compared to the 18°C temperature, maintained prior to GreenHop. Adopt 23°C temperature as a new operating standard resulted in a decrease of the PUE metric of 2.34 to 1.71 points. The GreenHop solution is based on open source software and hardware. The approach of using open source solutions enables its deployment easier and independently of suppliers at the same time makes the solution scalable to the needs of each organization. Thus, the objective is to provide an energetic and environmental monitoring solution for DCs server room, through a customizable and easy to implement and replicate system.

**Keywords:** Data Centers, Monitoring, Open Source, Energy efficiency

## Lista de Figuras

1.1	Síntese da demanda de energia elétrica em <i>Data Centers</i> (DCs). . . . .	13
2.1	Subespaços de um DC. . . . .	18
4.1	Fluxo dos dados entre nodos finais e nodo coordenador. . . . .	59
5.1	Ambiente usado como estudo de caso: LabP2D. . . . .	66
5.2	Distribuição dos nodos no LabP2D. . . . .	68
6.1	Gráfico das temperaturas e consumo de energia a 18°C. . . . .	75
6.2	Gráfico das temperaturas e consumo de energia a 23°C. . . . .	77
6.3	Gráfico das temperaturas e consumo de energia a 25°C. . . . .	78
6.4	Gráfico do comportamento das temperaturas durante o <i>free cooling</i> . . .	79
6.5	Gráfico das demandas (A) e PUE (B) em 18°C. . . . .	80
6.6	Gráfico das demandas (A) e PUE (B) em 23°C. . . . .	81
6.7	Gráfico das demandas (A) e PUE (B) em 25°C. . . . .	82
6.8	Gráfico das demandas (A) e PUE (B) durante o <i>free cooling</i> . . . . .	84



## Lista de Abreviaturas

**HPC** *High Performance Computing*

**GPU** Unidade de Processamento Gráfico

**RCI** *Rack Cooling Index*

**RTI** *Return Temperature Index*

**TR** Toneladas de Refrigeração

**JSON** *JavaScript Object Notation*

**SNMP** *Simple Network Management Protocol*

**CoE** *Center of Expertise for Energy Efficiency in Data Centers*

**USDE** Departamento de Energia dos Estados Unidos

**ANSI** *American National Standards Institute*

**ASHRAE** *American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers*

**BICSI** *Building Industry Consulting Service International*

**CENELEC** *European Committee for Electrotechnical Standardization*

**CPU** Unidade Central de Processamento

**DC** *Data Center*

**DCiE** *Data Center Infrastructure Efficiency*

**DCIM** *Data Center Infrastructure Management*

**HVAC** *heating, ventilation and air conditioning*

**IaaS** *Infrastructure as a Service*

**IEC** *International Electrotechnical Commission*

**IoT** *Internet of Things*

**ISO** *International Organization for Standardization*

**IDC** *International Data Corporation*

**LabP2D** Laboratório de Processamento Paralelo e Distribuído

**LED** *Light Emitting Diode*

**MAC** *Media Access Control*

**MCU** Microcontrolador

**PaaS** *Platform as a Service*

**PDU** *Power Distribution Unit*

**PUE** *Power Usage Effectiveness*

**RF** Rádio Frequência

**RGB** *Red, Green, Blue*

**RSSF** Rede de Sensores Sem Fio

**SaaS** *Software as a Service*

**SNMP** *Simple Network Management Protocol*

**SoC** *System on a Chip*

**SO** Sistemas Operacionais

**TBS** Temperatura Bulbo Seco

**TI** Tecnologia da Informação

**TIC** Tecnologia da Informação e Comunicação

**TIA** *Telecommunications Industry Association*

**UPS** *Uninterruptible Power Supply*

**VLL** Virtual Leased Line

## Lista de Tabelas

2.1	Classificação de confiabilidade da TIA-942. . . . .	19
2.2	Notações utilizadas na classificação de densidade e tamanho. . . . .	21
2.3	Definição de Data Centers por Tamanho. . . . .	22
2.4	Definição de Data Centers por Densidade. . . . .	23
2.5	Combinação do Tamanho com a Densidade. . . . .	23
2.6	Classificação de DC por porte. . . . .	24
2.7	Requisitos do sistema de refrigeração de DC. . . . .	31
2.8	Métricas de eficiência energética. . . . .	34
2.9	Soluções <i>open source</i> de monitoramento da sala de servidores. . . . .	41
3.1	Relação de requisitos satisfeitos com as escolhas de componentes. . .	53
4.1	Sensores de baixo custo testados no GreenHop. . . . .	61
4.2	Relação da satisfação dos requisitos funcionais. . . . .	63
4.3	Relação da satisfação dos requisitos não-funcionais. . . . .	64
5.1	Relação de nodos utilizados no estudo de caso. . . . .	69
5.2	Síntese do plano de testes realizado no LabP2D. . . . .	72
6.1	Resultados dos experimentos dos parâmetros ambientais. . . . .	85
6.2	Consolidação dos resultados dos experimentos do PUE. . . . .	86
7.1	Cumprimento do cronograma no TCC. . . . .	91

# Sumário

<b>Lista de Figuras</b>	<b>5</b>
<b>Lista de Abreviaturas</b>	<b>6</b>
<b>Lista de Tabelas</b>	<b>8</b>
<b>1 Introdução</b>	<b>12</b>
<b>2 Data center</b>	<b>16</b>
2.1 Definição de Data Center . . . . .	16
2.2 Classificações de Data Centers . . . . .	18
2.2.1 Classificação por confiabilidade . . . . .	19
2.2.2 Classificação por densidade e tamanho . . . . .	20
2.2.3 Classificação por porte . . . . .	24
2.3 Data Centers para organizações de pequeno porte . . . . .	25
2.3.1 Tipos de calor . . . . .	27
2.4 Normas para Data Center . . . . .	29
2.5 Políticas de eficiência energética para DCs . . . . .	32
2.6 Métricas para Data Center . . . . .	33
2.7 Soluções correlatas de monitoramento . . . . .	36
2.7.1 Soluções Proprietárias . . . . .	37
2.7.2 Soluções Open Source . . . . .	38
2.7.3 Comparação dos trabalhos correlatos . . . . .	41
2.8 Considerações Parciais . . . . .	42

<b>3</b>	<b>Análise de requisitos e definição dos componentes da solução</b>	<b>44</b>
3.1	Documento de requisitos . . . . .	44
3.1.1	Finalidade da solução proposta . . . . .	45
3.1.2	Requisitos Funcionais . . . . .	45
3.1.3	Requisitos Não Funcionais . . . . .	47
3.2	Componentes de software e hardware livre da solução proposta . . . . .	49
3.2.1	Protocolos de comunicação . . . . .	49
3.2.2	Microcontroladores . . . . .	50
3.2.3	Unidade de processamento . . . . .	51
3.2.4	Sistema operacional & linguagens de programação . . . . .	51
3.2.5	Software de monitoramento . . . . .	52
3.3	Satisfação dos componentes pelo documento de requisitos . . . . .	52
3.4	Considerações Parciais . . . . .	53
<b>4</b>	<b>Solução de monitoração proposta: GreenHop</b>	<b>54</b>
4.1	Objetivo da solução GreenHop . . . . .	54
4.2	Constituição da Rede de Sensores Sem Fio (RSSF) . . . . .	55
4.3	Constituição dos nodos de sensores . . . . .	56
4.4	Características dos sensores . . . . .	59
4.5	Requisitos vs. Solução proposta . . . . .	62
4.6	Considerações Parciais . . . . .	62
<b>5</b>	<b>Estudo de caso &amp; Plano de testes</b>	<b>65</b>
5.1	Estudo de caso . . . . .	65
5.2	Plano de testes . . . . .	67
5.2.1	Organização dos nodos . . . . .	67
5.2.2	Teste 1: Temperatura a 18°C . . . . .	70
5.2.3	Teste 2: Temperatura a 23°C . . . . .	70

5.2.4	Teste 3: Temperatura a 25°C . . . . .	70
5.2.5	Teste 4: Free Cooling . . . . .	71
5.2.6	Consolidação do plano de testes . . . . .	71
5.3	Considerações Parciais . . . . .	72
<b>6</b>	<b>Resultados obtidos &amp; Análise dos resultados</b>	<b>73</b>
6.1	Resultados obtidos . . . . .	73
6.1.1	Resultados do monitoramento dos parâmetros ambientais . . . .	74
6.1.2	Resultados do monitoramento da métrica PUE . . . . .	79
6.2	Consolidação e Análise dos resultados . . . . .	83
6.2.1	Monitoramento ambiental . . . . .	83
6.2.2	Monitoramento do PUE . . . . .	85
6.2.3	Considerações gerais sobre os resultados coletados . . . . .	86
<b>7</b>	<b>Considerações finais do TCC-II &amp; Trabalhos futuros</b>	<b>88</b>
7.1	Trabalhos futuros . . . . .	89
7.2	Cronograma . . . . .	90
7.2.1	Etapas realizadas . . . . .	90
7.2.2	Cumprimento do cronograma . . . . .	91
	<b>Referências Bibliográficas</b>	<b>92</b>
<b>A</b>	<b>Apêndice: Código Fonte do projeto GreenHop</b>	<b>100</b>
<b>B</b>	<b>Apêndice: Diagramas e esquemáticos do hardware utilizado</b>	<b>101</b>
<b>C</b>	<b>Apêndice: Artigos Publicados</b>	<b>104</b>
<b>D</b>	<b>Apêndice: Revisão Bibliográfica</b>	<b>107</b>
<b>E</b>	<b>Apêndice: Plano do TCC</b>	<b>111</b>

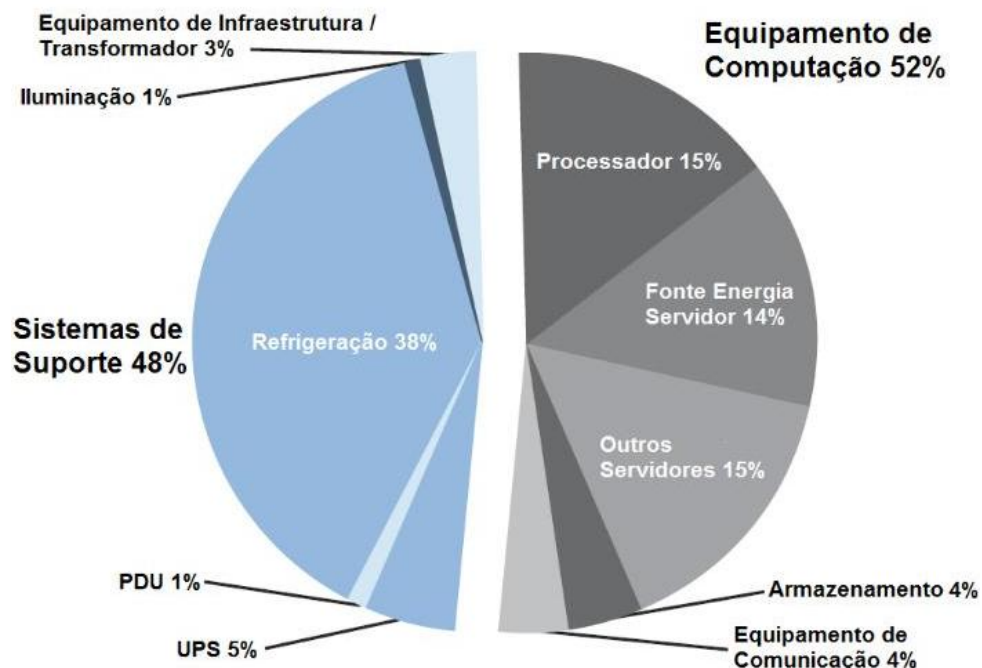
# 1 Introdução

A quantidade de dados produzidos pela humanidade dobra a cada dois anos, segundo dados da *International Data Corporation* (IDC) (TURNER et al., 2014). Esta demanda traz crescentes desafios para as organizações que possuem ou dependem de serviços providos por DCs (SILVA, 2015). Um destes desafios está relacionado ao uso de energia elétrica em sua infraestrutura, restringindo indiretamente a sua expansão (EMERSON-NETWORK, 2012). Mesmo buscando soluções que possam gerar eficiência energética, como a consolidação de servidores (MORABITO, 2015) e a adoção de componentes de hardware mais eficientes, os DCs continuam a crescer em quantidade e tamanho (VILLARS; SHIRER, 2014) para suprir a demanda computacional exigida pelo advento de novos paradigmas, como a *Internet of Things* (IoT) e a computação em nuvem, acompanhando o exigente mercado de Tecnologia da Informação (TI) (MITTAL, 2014).

Nos últimos dez anos, o impacto ambiental de DCs tem sido fonte de diversas pesquisas (BROWN et al., 2008; BHAGWAT et al., 2012; CHEN; IRVING; PENG, 2015), estimando-se que até 2011, tenha sido responsável por aproximadamente 2% do consumo energético mundial. Os equipamentos computacionais necessitam operar em condições ambientais rigidamente controladas, sendo que o sistema de refrigeração da sala de servidores possui uma das maiores demandas no consumo energético de um DC (RUBENSTEIN; FAIST, 2014). Em um estudo realizado em 2012 pela Emerson Network Power em DCs de médio a grande porte e área física de aproximadamente  $5000 \text{ ft}^2$  ( $464 \text{ m}^2$ ), mostra a demanda de consumo de energia dos principais subsistemas de um DC (EMERSON-NETWORK, 2012). A Figura 1.1 apresenta a consolidação dos resultados desta pesquisa.

O sistema de refrigeração é importante para manter os equipamentos de TI em funcionamento contínuo e deve operar de acordo com os parâmetros especificados por normas técnicas que auxiliam o desenvolvimento e implantação de um DC. Analisando a Figura 1.1, é possível identificar que a refrigeração, pertencente aos sistemas de suporte, corresponde a maior proporção (38%) do consumo total de um DC. Outras pesquisas mostram dados similares (DAVID; SCHMIDT, 2014; RUBENSTEIN; FAIST,

Figura 1.1: Síntese da demanda de energia elétrica em DCs.



Fonte: Adaptado de Emerson-Network (2012).

2014), podendo chegar a até 60% do consumo total do DC (RODRIGUEZ et al., 2011). Em seguida, os processadores dos servidores representam 15% do consumo total. O resultado destes estudos indicam que, com a análise do consumo dos subsistemas de um DC, é factível obter alguma eficiência energética, permitindo uma redução de custos e do impacto ambiental causado por este setor.

Dentre os custos operacionais de um DC, os gastos relacionados a energia elétrica possuem impacto considerável, contribuindo com aproximadamente 50% das despesas (COMERFORD, 2015). Um dos desafios encontrados por gestores de TI é reduzir os custos e aumentar a eficiência dos seus processos com o mínimo investimento, devendo identificar as deficiências de desempenho e implementar as soluções necessárias (PAIM et al., 2009). Uma das formas de obter indicadores de desempenho é através da aplicação de métricas (e.g., *Power Usage Effectiveness* (PUE) e *Data Center Infrastructure Efficiency* (DCiE)) para DCs (WANG; KHAN, 2011; VOLK et al., 2013; DAI et al., 2014), permitindo relacionar o comportamento do consumo de energia entre os sistemas computacionais e de suporte.

Para definir os parâmetros que compõem estas métricas, é necessário uma ferramenta de monitoramento que permita medir o comportamento dos equipamentos.



Todavia, estas ferramentas são tipicamente proprietárias e possuem um alto valor de aquisição, sendo inacessível para organizações possuem investimentos reduzidos na área de TI (MOGAMI; RODRIGUES, 2014). Entretanto, destaca-se a adoção de plataformas de código aberto (hardware e software) como opção às ferramentas proprietárias, que permitem monitorar tanto o consumo energético quanto as condições ambientais (LIAPERDOS et al., 2010; RODRIGUEZ et al., 2011). Especificamente para DC, estas tecnologias *open source* possibilitam monitorar a sala de servidores, permitindo conhecer a eficácia do sistema de refrigeração e conhecer as deficiências na distribuição de ar frio, ao mesmo tempo em que se obtém os parâmetros de consumo de energia, essencial para o cálculo das métricas.

Com o levantamento destas problemáticas, o trabalho atual visa o desenvolvimento de uma solução de monitoramento ambiental e energético *open source* da sala de servidores de DCs de forma automatizada, verificando se estão de acordo com as faixas de variação especificadas por normas técnicas para DCs. É de suma importância medir o consumo de energia dos equipamentos envolvidos, a fim de correlacionar estes dados em uma métrica que indique os ganhos com a eficiência energética ao adotar determinadas políticas de eficiência energética.

O presente trabalho apresenta a análise, projeto, desenvolvimento e testes da solução denominada GreenHop. O objetivo é atingido através da realização de atividades organizadas em duas etapas:

- TCC-I: Realizar a análise, projeto, desenvolvimento e pré-testes em período inicial, apresentando o primeiro protótipo da solução GreenHop; e
- TCC-II: Refinar a análise, projeto, desenvolvimento e testes de campo definitivos da versão completa da solução GreenHop.

O método de pesquisa adotado neste trabalho é a pesquisa aplicada. Sendo assim, na primeira parte do trabalho é realizada uma pesquisa referenciada, utilizada para identificar os requisitos que são implementados na solução desenvolvida, empregando a pesquisa aplicada para o desenvolvimento e testes.

O presente trabalho está organizado da seguinte forma. O Capítulo 2 introduz algumas definições, classificações e as principais normas e métricas para DCs, salientando a necessidade de monitoração ambiental e energética, bem como da re-

alidade do DCs de pequenas organizações, mostrando duas políticas de eficiência energética que podem ser adotadas por estas organizações. Também são apresentados os trabalhos correlatos, listando as principais soluções de monitoramento existentes, enfatizando as soluções desenvolvidas com software e hardware *open source*. É definido o documento de requisitos no Capítulo 3, onde são analisados os principais aspectos a serem monitorados em um DC e quais as opções disponíveis de recursos de software e hardware que satisfaçam os requisitos levantados. Com base na fundamentação das seções iniciais, o Capítulo 4 descreve de forma minuciosa a solução GreenHop, como são implementados os nodos da RSSF e como os requisitos previamente levantados são satisfeitos pela solução desenvolvida. É apresentado o ambiente de estudo de caso no Capítulo 5, bem como o plano de testes para a aplicação da solução GreenHop neste ambiente. No Capítulo 6, os resultados coletados durante os testes são organizados e discutidos individualmente, sendo apresentado ao final uma síntese destas informações. Por fim, o Capítulo 7 lista as considerações finais com base nos conceitos relacionados e na aplicação do GreenHop no estudo de caso, mostrando algumas perspectivas para os trabalhos futuros.

## 2 Data center

Os DCs são parte fundamental da Internet, fornecendo serviços de computação e armazenamento às principais soluções de TI atuais, como: computação em nuvem, aplicações para dispositivos móveis, *Internet of Things* (IoT), *Big Data*, redes sociais, etc. Neste capítulo são abordados os fundamentos sobre DCs, tais como definições essenciais, métodos de classificação, normas técnicas, métricas para DC, bem como a necessidade de monitoramento em DCs abrigados por organizações de pequeno porte, mostrando algumas políticas de eficiência energética que podem ser adotadas para reduzir o consumo de energia. Por fim, são listadas as principais soluções de monitoramento para DCs correlatas, mostrando uma comparação entre estas soluções, com foco em licenças de software e hardware *open source*.

### 2.1 Definição de Data Center

Normalmente, DCs estão associados com a ideia de uma infraestrutura computacional confiável e escalável para serviços massivos de Internet (HELLER et al., 2010). Segundo Geng (2014), a Agência Nacional de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (EPA), define DC como sendo um conjunto de equipamentos servidores, armazenamento e de rede, que em conjunto processam, armazenam e transmitem informações digitais. Possuem conversão de energia elétrica especializada, equipamentos de *backup* bem como equipamentos de controle ambiental para manter a temperatura e umidade adequadas para os equipamentos TI. De forma mais generaliza, Sharma (2009) *apud* Khan e Zomaya (2015) definem DCs como uma instalação física especializada em abrigar sistemas computacionais tais como servidores, dispositivos de armazenamento e equipamentos de rede. Com o objetivo de abranger DCs heterogêneos, *i.e.*, com equipamentos de diversos fabricantes, e independentemente de seu tipo de aplicação, é adotada esta última definição.

O termo “Data Center” é comumente usado para designar diferentes aplicações, podendo ser encontrado sob diferentes nomenclaturas. Segundo Geng (2014),

alguns nomes utilizados são: Fazenda de Dados (*Data Farm*), Armazém de Dados (*Data Warehouse*), Sala de Servidores (*Server Room*), Laboratório de Pesquisa e Desenvolvimento de Software (*R&D Software Lab*), Laboratório de Computação de Alto Desempenho (*High Performance Computing (HPC)-Lab*), Centro de Locação Colaborativa (*Colocation Centre*), Centro de Processamento de Dados (CPD), dentre outros. Atualmente, os DCs formam a espinha dorsal de uma ampla variedade de serviços oferecidos através da Internet, incluindo hospedagem (*web-hosting*), *e-commerce* e redes sociais, além de serviços relacionados ao paradigmas de computação em nuvem, tais como: software como serviço (*Software as a Service (SaaS)*), plataforma como serviço (*Platform as a Service (PaaS)*) e infraestrutura como serviço (*Infrastructure as a Service (IaaS)*), podendo ser encontrados outros tipos de aplicações. A virtualização é um elemento fundamental à prestação de muitas destas aplicações e está sendo cada vez mais utilizada em DCs para otimizar a utilização do servidor e flexibilizar a alocação de recursos. Sendo assim, os DCs possuem uma estrutura organizacional e composição, podendo possuir diferenças de acordo com o seu propósito ou da organização que o mantém.

Um DC pode ser composto por um ou mais subespaços, tais como: salas de servidores, telecomunicações, distribuição de energia elétrica, mecânica, logística e administrativas (TIA-942, 2005). Um exemplo desta composição de espaços está exemplificado na Figura 2.1. Contudo, algumas organizações possuem apenas a sala de servidores, utilizando-a para abrigar todos os equipamentos de TI e de suporte neste ambiente. Portanto, salienta-se que dentre os diversos ambientes que podem compor um DC, o presente trabalho está voltado apenas para o ambiente da sala de servidores.

Podem existir diferentes proporções entre estes subespaços, variando de acordo com a necessidade da organização que abriga o DC. Instituições baseadas exclusivamente em serviços de TI tendem a possuir uma maior distribuição destes subespaços, utilizando-os para organizar sua estrutura de forma eficiente. Já as instituições que utilizam os serviços de TI apenas como apoio, tendem a possuir uma estrutura mais reduzida. Para que seja possível estabelecer uma relação clara entre estes diversos tipos, DCs podem ser classificados de acordo com alguns critérios, como a confiabilidade, densidade e porte.

Figura 2.1: Subespaços de um DC.



Fonte: Adaptado de TIA-942 (2005).

## 2.2 Classificações de Data Centers

De forma fundamental, a necessidade de classificação é importante para definir as diferentes relações de proporção que um DC pode alcançar, pois o que é considerado como “grande” sob um ponto de vista, pode ser considerada “pequeno” de outro. Da mesma forma em relação à densidade, que pode ser considerada como “alta” por uma organização e “baixa” por outra (ANDREA; WALLACE, 2014). Com o objetivo de deliberar uma discussão clara e objetiva, as classificações são de suma importância para definir o ambiente de estudo de caso. Existem diferentes classificações para DC na literatura (ARNO et al., 2012; ANDREA; WALLACE, 2014; SYMANSKI; WATKINS, 2010), das quais pode-se destacar três abordagens:

- A classificação relacionada à confiabilidade é determinada através de quatro camadas (*tiers*), variando da *tier* 1 mais baixa até a *tier* 4 mais alta (ARNO et al., 2012) - descrita na Seção 2.2.1.
- A classificação por densidade relaciona a potência dos *racks* por unidade de espaço e são empregadas quatro categorias, que variam de baixa densidade até a densidade extrema (ANDREA; WALLACE, 2014) - descrita na Seção 2.2.2.
- A classificação por porte do DC, relaciona a quantidade de servidores por local

e varia de Armário de Servidores até o DC Empresarial (SYMANSKI; WATKINS, 2010) - descrita na Seção 2.2.3.

### 2.2.1 Classificação por confiabilidade

A abordagem utilizada para classificar DCs segundo critério de confiabilidade, foi inicialmente estabelecida pelo consórcio Uptime Institute (ARNO et al., 2012) e posteriormente utilizada pela norma *Telecommunications Industry Association* (TIA)-942 (TIA-942, 2005) (definida na Seção 2.4). Esta classificação descreve os requisitos para a infraestrutura do DC, classificando-o em quatro camadas de níveis críticos, intituladas *tiers*. Quanto maior for esta *tier*, maior será a disponibilidade, estipulada em horas/ano, e mais sofisticado será o DC (VERAS, 2009).

A norma TIA-942 define a classificação dos DC em quatro níveis de *tiers* independentes, considerando aspectos de arquitetura, telecomunicações, elétricos e mecânicos. A Tabela 2.1 apresenta estas *tiers* de acordo com a disponibilidade, indisponibilidade (*downtime*) e as principais características de cada *tier*.

Tabela 2.1: Classificação de confiabilidade da TIA-942.

<b>Tiers</b>	<b>Disponibilidade</b>	<b>Downtime</b>	<b>Características</b>
<i>Tier 1</i>	99,671%	28.8 horas/ano	DC básico; Caminho único para energia e refrigeração, sem componentes redundantes; Falha elétrica pode causar a interrupção parcial ou total das operações.
<i>Tier 2</i>	99,741%	22 horas/ano	Componentes redundantes; Múltiplos canais para energia e refrigeração (1 ativo), com componentes redundantes (N+1); Falhas na refrigeração ou energia podem ocasionar falhas em todos os outros componentes.
<i>Tier 3</i>	99,982%	1.6 horas/ano	Sistema auto sustentado; Múltiplos canais para energia e refrigeração (1 ativo), com componentes redundantes (N+1); Catástrofes poderão interromper todos os serviços.
<i>Tier 4</i>	99,995%	0.4 horas/ano	Tolerante a falhas; Múltiplos canais ativos para energia e refrigeração, com componentes redundantes 2(N+1).

Fonte: Adaptado de Veras (2009).

Adicionalmente, a norma TIA-942 relaciona as *tiers* com as especificações do sistema de refrigeração, abordando as características comuns de cada *tier*:

- **Tier 1:** O sistema de energia elétrica e refrigeração são direcionados por um ca-

minho único, sem componentes redundantes, o que torna o DC mais vulnerável a *downtimes* considerando que a falha em qualquer um dos sistemas causa impacto na refrigeração do mesmo.

- **Tier 2:** Apresenta sistemas de ar condicionado projetados para operação contínua (24x7) com redundância N+1, porém falhas nesse sistema podem ocasionar em falhas em todos os outros componentes do DC.
- **Tier 3:** São consideradas duas salas de entrada (espaço de interconexão entre o cabeamento estruturado do DC e o cabeamento vindo das operadoras de telecomunicações) com no mínimo 20 metros de separação, com equipamentos e sistemas de ar condicionados distintos.
- **Tier 4:** Inclui um sistema preciso de aquecimento, ventilação e ar condicionado (do inglês *heating, ventilation and air conditioning* (HVAC)) com múltiplas unidades de ar condicionado com capacidade de resfriamento combinada para manter a temperatura e a umidade relativa de áreas críticas nas condições projetadas.

A classificação de DCs, segundo o critério de confiabilidade da norma TIA-942 e Uptime Institute, é amplamente aceita na literatura e inclui uma abordagem mais abrangente em diversos aspectos do DC (ARNO et al., 2012). Através dela, pode-se observar os requisitos do sistema de refrigeração de acordo com a *tier*: quanto mais crítica é a missão do ambiente de DC, mais complexo será sua infraestrutura, e com isso, mais sofisticado o sistema de refrigeração deve ser. Todavia, deve-se considerar que os sistemas de refrigeração consomem uma grande parcela da potência energética dos DCs.

### 2.2.2 Classificação por densidade e tamanho

A classificação por densidade e tamanho é desenvolvida pela Strategic Directions Group, em parceria com o Data Center Institute – AFCOM. O desenvolvimento dessa classificação foi inicialmente motivado pela necessidade de considerar a capacidade de potência do servidor em relação a sua área ocupada (ANDREA; WALLACE, 2014), algo que as demais abordagens não consideram. Isso é necessário pois um DC de proporções reduzidas pode ser maior em capacidade de processamento do que uma

grande estrutura com inúmeros espaços brancos (vazios). Esta demanda maior de processamento vai influenciar no consumo de energia elétrica e no modo que sua eficiência é estudada e reportada.

Para utilizar esta classificação, são definidas duas tabelas iniciais. A primeira é a Tabela 2.3, que relaciona seis categorias de tamanho. A segunda Tabela 2.4 relaciona quatro categorias de densidade. Ao final estas duas tabelas são combinadas na Tabela 2.5. Seu resultado pode ser avaliado como uma média da medição da carga de pico (em kW) por espaço de computação ou *rack*. A Tabela 2.2 define as notações utilizadas nesta classificação.

Tabela 2.2: Notações utilizadas na classificação de densidade e tamanho.

Descrição	Notação
Rendimento do <i>rack</i>	<i>Racks</i> em operação ( $\rho$ )
Carga em kW de suporte computacional	Carga em kW ( $\delta$ )
Área do <i>rack</i> ( $\omega$ )	$\omega = 2,5m^2$
Espaço de computação ( $\alpha$ )	$\alpha = \rho * \omega$
Carga de pico média de $\alpha$	$\chi = \delta/\rho$
Unidade de medida de $\chi$	kW por <i>rack</i> (kW/rack)

Fonte: Adaptado de Andrea e Wallace (2014).

A carga de pico média é similar a uma métrica comumente aplicada em conceitos de engenharia elétrica, chamada Fator de Carga (PATRICK; FARDO, 2008), usada estimar os diversos tipos de carga, fornecendo informação adicional para melhorar o projeto e a eficiência de sistemas de energia elétrica.

### Tamanho de Data Center

O tamanho do DC é determinado pelo espaço de computação ( $\alpha$ ) e o rendimento do *rack* ( $\rho$ ), usando como base as notações inicialmente estabelecidas na Tabela 2.2. A Tabela 2.3 relaciona seis categorias de tamanho (de Mini a Mega) com o rendimento do *rack* e o espaço de computação, ambos em  $m^2$ .

No caso de haver uma discordância entre o rendimento *rack* e o espaço de computação em um DC em particular, o valor da maior métrica irá determinar o



Tabela 2.3: Definição de Data Centers por Tamanho.

Métrica de Tamanho	Rendimento de <i>rack</i> (unidades)	Espaço de computação ( $m^2$ )
<b>Mega</b>	$\geq 9001$	$\geq 22501$
<b>Massivo</b>	3001 - 9000	7501 - 22500
<b>Grande</b>	801 - 3000	2001 - 7500
<b>Médio</b>	201 - 800	501 - 2000
<b>Pequeno</b>	11 - 200	26 - 500
<b>Mini</b>	1 - 10	1 - 25

Fonte: Adaptado de Andrea e Wallace (2014).

tamanho da instalação. Por exemplo, em uma instalação que acomoda 205 *racks* em um espaço de computação de  $490m^2$ , O DC será considerado como de tamanho Médio.

### Densidade do Data Center

Para o fator densidade, é proposto que o valor da carga de pico mensurado seja usado ao invés de usar o valor projetado ou ainda a densidade média, como é normalmente aplicado em outras descrições similares. A classificação leva em conta tanto a densidade de *rack* quanto o espaço de computação, sendo este último definido como carga de pico medido dividido pelo rendimento do *rack*. A Tabela 2.4 lista as quatro faixa de valores, que variam entre Extremo e Baixo e todas as unidade são dadas em kW.

Utilizando como exemplo um DC com perfil voltado à Computação de Alto Desempenho (HPC) e que normalmente utiliza uma alta carga de processamento em Unidade Central de Processamento (CPU) e Unidade de Processamento Gráfico (GPU), um *rack* pode facilmente chegar aos 10kW de pico de potência. Neste caso, quando aplicada a classificação por densidade, o DC é considerado de densidade Alta, pois seu pico mensurado está entre 9 kW e 15 kW.

Tabela 2.4: Definição de Data Centers por Densidade.

Métrica de Densidade	Por <i>rack</i>	Por espaço de computação
<b>Extrema</b>	$\geq 16$ kW	$\geq 16$ kW
<b>Alta</b>	9 - 15 kW	9 - 15 kW
<b>Média</b>	5 - 8 kW	5 - 8 kW
<b>Baixa</b>	0 - 4 kW	0 - 4 kW

Fonte: Adaptado de Andrea e Wallace (2014).

### Classificação geral por densidade e tamanho

Com a finalidade de abranger as características de densidade e tamanho em apenas uma classificação, as duas Tabelas anteriores (Tabela 2.3 e Tabela 2.4) são combinadas na Tabela 2.5). As linhas descrevem os quatro graus de densidade, enquanto as colunas são os seis graus de tamanho. Esta tabela deverá ser preenchida conforme a classificação das duas primeiras Tabelas (2.3 e 2.4).

Tabela 2.5: Combinação do Tamanho com a Densidade.

<b>DENSIDADE</b>	<b>Extrema</b>						
	<b>Alta</b>			⊗			
	<b>Média</b>						
	<b>Baixa</b>						
		<b>Mini</b>	<b>Pequeno</b>	<b>Médio</b>	<b>Grande</b>	<b>Massivo</b>	<b>Mega</b>
<b>TAMANHO</b>							

Fonte: Adaptado de Andrea e Wallace (2014).

Utilizando os exemplos anteriormente citados, um DC com perfil de HPC, com densidade de 10 kW/ rack em um espaço de computação de  $490m^2$  que acomoda 205 *racks*, a classificação final é de uma instalação de alta densidade e de tamanho médio. Na Tabela 2.5, o marcador ⊗ classifica o exemplo citado.

O desenvolvimento de um projeto de DC pode utilizar as classificações descritas nesta seção para auxiliar a direcionar o crescimento da área restante (ANDREA; WALLACE, 2014), de acordo com a infraestrutura de energia elétrica e refrigeração

existentes. É possível também verificar se será necessário redimensionar alguns subsistemas para atender à nova demanda (BELL, 2005). Observa-se nesta classificação que é mais complexa, pois exige a análise de diversas variáveis do DC. Contudo, se for necessário classificar um DC de forma mais simplificada, existem outras classificações que podem ser utilizadas.

### 2.2.3 Classificação por porte

A abordagem de classificação para DCs que utiliza os critérios de porte, é definida por Bailey et al. (2007) *apud* (AROCA, 2016), que usa a quantidade de servidores por unidade de instalação físicas. Esta classificação pode ser vista como mais simplificada, pois não necessita de informações tão específicas do DC, como é o caso da classificação descrita na Seção 2.2.2. A Tabela 2.6 define seis categorias de DC, que variam de Armário de Servidores, com menor porte, até o DC Empresarial, com maior porte. Além da quantidade de servidores existentes em cada instalação, esta classificação também especifica os critérios de disponibilidade com a redundância de energia elétrica com sistema de energia ininterrupta (*Uninterruptible Power Supply* (UPS)). Porém, salienta-se que a presente classificação não restringe-se às características da coluna 'Energia'.

Tabela 2.6: Classificação de DC por porte.

Categoria	Nº de Servidores	Média de Servidores	Energia
<b>DC Empresarial</b>	Centenas a milhares	515	Redundância (N+1)
<b>DC Médio</b>	Centenas	192	Alguma redundância
<b>DC Local</b>	Dezenas a centenas	32	Alguma redundância
<b>Sala de Servidores</b>	Unidades a dezenas	3	Um UPS
<b>Armário de Servidores</b>	1 a 2	2	Sem UPS

Fonte: Adaptado de Bailey et al. (2007).

A classificação da Tabela 2.6) é elaborada através da pesquisa de Bailey et al. (2007), realizada em mais de 154 mil organizações nos Estados Unidos que abrigam suas próprias infraestruturas de TI. Apenas 3,1% das organizações pesquisadas enquadram-se nas categorias de DC Empresarial, Médio e Local, abrigando 59% de

todos os servidores. A maior parte, *i.e.*, 96,9% das organizações, pertencem às duas menores categorias: Sala de Servidores e Armário de Servidores, que juntas contabilizam 41% do total de servidores. Em sua grande maioria, estas organizações são constituídas de hospitais, universidades, redes de varejo, supermercados e prestadores de serviços, *i.e.*, estabelecimentos caracterizados por possuir baixo *expertise* no gerenciamento de espaço, energia elétrica e condições ambientais. A quantidade de energia elétrica necessária para manter suas infraestruturas em operação contínua é a que gera o maior impacto no consumo energético mundial, com cerca de 95% de todos os DCs (THIBODEAU, 2014) *apud* (DELFORGE, 2014). Com isso é possível inferir que as ações para reduzir o consumo de energia podem ser focadas neste perfil de organização. Todavia, como não se gerencia o que não se mede (ASHRAE, 2010), estima-se que o passo inicial é conhecer o comportamento do consumo de energia elétrica para planejar e agir com propriedade sobre a causa.

Esta realidade mostra-se preocupante e está presente em diversos países, como o Brasil por exemplo. De acordo com Mogami e Rodrigues (2014), do total de empresas existentes no país, aproximadamente 99% são classificadas como organizações de pequeno porte, com até cem funcionários, e a crescente demanda de comunicação de dados, armazenamento e rede desses estabelecimentos não pode ser ignorada.

## 2.3 Data Centers para organizações de pequeno porte

Segundo uma pesquisa da EMBRATEL-Teleco (2015), recentemente realizada com quatrocentas empresas de cinco estados brasileiros, mostrou que 75% destes estabelecimentos abrigam seus própria infraestrutura de TI. Contudo, apenas 8% utilizavam algum tipo de serviço de computação em nuvem, contratando empresas especializadas. O crescimento contínuo do volume de informações em formato digital, criou a necessidade de manter essas informações em um local confiável. Mesmo que a terceirização de uma solução de computação em nuvem seja uma tendência para organizações de pequeno porte (SANCHEZ; CAPPELLOZZA, 2012; SILVA, 2015), uma parcela significativa ainda mantém os seus próprios servidores em suas infraestruturas locais visando a segurança de dados sensíveis. Estas organizações ainda optam

por adquirir e gerenciar os seus próprios equipamentos de TI, ou atualizá-los, como forma de aumentar o desempenho e confiabilidade dos seus serviços que dependem de Tecnologia da Informação e Comunicação (TIC).

Para que as operações computacionais possam manter-se seguras e em alta disponibilidade, organizações que possuem armário ou sala de servidores como único ambiente de infraestrutura de TI, devem considerar boas práticas durante o todas as fases de planejamento e implantação e operação de seu DC (MOGAMI; RODRIGUES, 2014). Porém, a realidade da maior parte destas organizações é de empregar computadores do tipo *desktops* como servidores e em condições inadequadas de operação (SILVA, 2015). Os computadores *desktops* operam em uma faixa maior de temperatura e umidade para operação quando comparado aos servidores de *rack*, devido a natureza heterogênea do ambiente físico no qual estes equipamentos são utilizados pelos usuários finais. Todavia, os *desktops* não são desenvolvidos para trabalhar continuamente (24/7). O impacto energético destes computadores é alto, comparando-se o consumo com a capacidade de processamento destes equipamentos, pois não são processadores voltados ao alto desempenho e possuem periféricos subutilizados pela aplicação do servidor e que consomem ainda mais energia elétrica. Uma solução encontrada para aumentar a capacidade de processamento é organizar estes computadores em *clusters*, multiplicando ainda mais o consumo de energia elétrica não aproveitável. Contudo, quando ocorre a migração desta estrutura legada para servidores especializados do tipo *rack*, é comum que a sala não acompanhe esta atualização, mantendo as condições inadequadas de temperatura e umidade para abrigar estes novos equipamentos (MOGAMI; RODRIGUES, 2014). O efeito da sobrecarga de temperatura em processadores e memória RAM podem diminuir consideravelmente a sua vida útil ou até mesmo gerar resultados operacionais indesejados (ZHANG et al., 2015; LIM; LIM; KANG, 2015). A oscilação de temperatura é extremamente prejudicial aos processadores de alto desempenho, em função da expansão e contração térmica em um curto período de tempo. Um outro fator impactante na redução da vida útil dos equipamentos está na umidade. Quando alta, a umidade em conjunto com partículas de poeira no ar podem causar falhas por poeira higroscópicas e quando em conjunto com gases pode causar a corrosão dos circuitos elétricos dos equipamentos de TI (IBM Knowledge Center, 2013). Por outro lado, quando esta umidade está baixa, pode gerar eletricidade estática e danificar componentes

sensíveis.

Uma solução usualmente aplicada por organizações de pequeno porte é a utilização de equipamento de ar condicionado de conforto (tipo *split*) (SILVA, 2015), que possuem um consumo de energia elétrica alto em relação à sua capacidade de resfriamento. Considerando a necessidade da redundância, é indicado que estejam disponíveis, ao menos, dois equipamentos de ar condicionado. Esta redundância permite alternar o uso entre os equipamentos, pois em caso de falha de um equipamento o outro conseguirá suprir a demanda de refrigeração de forma emergencial. Uma outra forma de uso é utilizar os dois equipamentos (ou mais) simultaneamente, de forma a suprir uma demanda de calor desconhecida. Contudo, este tipo de equipamento de refrigeração é inadequado para uso contínuo (24/7) devido a sua baixa eficiência energética e de capacidade de refrigeração para o tipo de calor gerado em um ambiente de DC.

### 2.3.1 Tipos de calor

Para especificar qual o equipamento de ar condicionado pode ser o mais adequado para um DC, se faz necessário definir quais os tipos de calor são possíveis de ser gerados nesse ambiente. De acordo com Singh (2011), especificamente em climatização sob a ótica da engenharia mecânica, os tipos de calor podem ser divididos em duas categorias:

- **Calor sensível:** Fontes de calor responsável por alterar a temperatura do ar, como por exemplo motores, computadores, iluminação, transformadores de energia elétrica, entre outros.
- **Calor latente:** Fontes de calor responsável por alterar a umidade do ar, como a evaporação de água, a transpiração e a respiração humana.

Para ambientes de climatização de conforto comum, a relação entre o calor sensível e calor latente é de cerca de 70% (*i.e.*, 70% sensível e 30% latente) (SINGH, 2011). Em um ambiente de DC, a relação entre o calor sensível e calor latente é de cerca de 90% (*i.e.*, 90% sensível e 10% latente). Desta forma, o sistema de climatização específico para um ambiente de DC deve ter a capacidade de retirar calor sensível, o que é feito insuflando maior vazão de ar no local.

O ideal para um ambiente de DC é que seja utilizado equipamentos de ar condicionado que comportem a capacidade térmica conforme a quantidade de calor gerada no local (dimensionamento correto). Normalmente são utilizados dois tipos de equipamentos para atender este tipo de ambiente:

- **Equipamentos centrais:** Equipamentos centrais de grande capacidade realizam insuflamento de ar pelo piso através de dutos, direcionando o ar diretamente nos *racks* e retiram o ar quente na parte superior do ambiente. Os principais modelos encontrados neste método são o *built in*, *roof top*, *self contained* e *displacement flow*, entre outros.
- **Chillers de precisão:** *Chillers* de precisão são especialmente produzidos para ambientes de DC e utilizam água como condução da temperatura que refrigerará diretamente os principais componentes que geram calor: CPU, GPU e memórias RAM. Além de ter os itens indicados nos equipamentos centrais, ainda contam com elementos de proteção e redução de consumo de energia, sendo mais eficientes quando comparado aos equipamentos centrais. Possuem alto índice de automação com sistemas de alerta contra alteração da temperatura e umidade, alertas de falha, entre outros.

Os *chillers* possuem um alto valor de aquisição e exige instalação especializada, sendo normalmente utilizados em DCs de portes médio e empresarial. Os equipamento centrais são os mais indicados para DCs de portes menores, quando comparados com a climatização de conforto humano. Possuem 35% maior eficiência energética, projetados com ventiladores controlados eletronicamente e sem correia-polia (menor manutenção e fuligem), alto nível de filtragem do ar para reter poeira, projetado para operação contínua (24/7), controle simultâneo de temperatura e umidade sem variação da temperatura ( $\pm 1$  °C) e vazão de ar é 62% maior que em equipamentos de conforto. A estabilidade térmica também depende de um sistema dotado de sensoriamento preciso e um controle inteligente embarcado no equipamento, normalmente um Microcontrolador (MCU) que controla toda a operação. Todavia, no ar condicionado de conforto há a possibilidade de adaptar esta automação, permitindo aumentar a estabilidade térmica e a integração com outros sistemas de automação e prevenção.

Especificamente sobre a climatização de conforto, deve-se evitar o uso em ambientes de DCs. Porém há situações e características que convergem para esta solução, como é o caso da restrição de verbas para investimento. Neste caso, deve-se ter em mente que está sendo feito um uso adaptado, principalmente em relação à criticidade do ambiente que o equipamento irá proteger e o esforço que ele será submetido. O dimensionamento dos equipamentos deve ser muito bem estudado acrescentando margens de segurança para mitigar o risco. As demais premissas devem ser observadas de forma similar aos equipamentos de precisão. Devem ser adotadas boas práticas para o uso de equipamentos de conforto em ambientes de sala de servidores, visando reduzir o impacto nos gastos e ambiental. É comum que os gestores adotem ações excessivamente cautelosas, sendo comum configurar a temperatura de operação do ar condicionado no mínimo possível (*e.g.*, 18°C), gerando um alto consumo de energia. Essa prática ocorre principalmente na tentativa de suprir uma demanda de calor desconhecida.

Para evitar problemas operacionais no DC, diversas normas estabelecem critérios a serem considerados desde as fases iniciais de planejamento, visando criar um ambiente adequado para a operação dos equipamentos computacionais. Como um possível resultado destas boas práticas, está a redução do consumo de energia elétrica e o aumento do tempo de vida dos equipamentos. Neste sentido, torna-se necessário o controle ambiental correto em todas as classes de DCs, permitindo que operem dentro dos limites estabelecidos pelas normas e ofereçam condições adequadas de operação aos equipamentos de TI.

## 2.4 Normas para Data Center

As normas e protocolos que definem as boas práticas de projeto, implantação e operação de um DC, são normalmente estabelecidas por associações técnicas industriais (DAI et al., 2014), formadas por diversos fabricantes de equipamentos de TI e pesquisadores da área. São exemplos de normas técnicas: ASHRAE-TC 9.9, ISO/IEC 24764, CENELEC-50600, ANSI/BICSI-002 e a ANSI/TIA-942-A, sendo que a última destaca-se por ser amplamente utilizada (YE; SONG; SUN, 2014). A série de normas da TIA são credenciadas pela *American National Standards Institute* (ANSI) para desen-



volver padrões para a indústria de uma ampla variedade de produtos de TI, sendo que atualmente representa cerca de 400 empresas.

Também conhecida como “*Telecommunications Infrastructure Standard for Data Centers*”, a TIA-942 tem o objetivo de fornecer diretrizes para padronizar todas as fases de desenvolvimento da infraestrutura do DC. Esta norma teve sua primeira publicação em 2005 e é periodicamente revisada, sendo que a última revisão oficial (TIA-942-A) foi realizada em 2013 (TIAONLINE.ORG, 2013), com previsão de uma nova revisão para 2016. De forma geral, a TIA-942 pode ser subdividida em quatro aspectos principais: espaço e *layout*, cabeamento estruturado, confiabilidade e considerações ambientais (TIA-942, 2005), sendo que o foco do presente trabalho está nas considerações ambientais.

Considerando que a sala dos servidores deve ser um ambiente rigidamente controlado e da necessidade de alta disponibilidade, é importante um monitoramento ininterrupto e que ações preditivas possam ser tomadas sem a ação humana. Os requisitos ambientais, especificados por normas técnicas, são guias para que o hardware dos equipamentos tenham maior durabilidade e operem corretamente, evitando sobrecarga de temperatura, eletricidade estática e corrosão, além de foco na redução do consumo de energia elétrica para a operação do DC. A Tabela 2.7 relaciona os requisitos da norma TIA-942, na versão de 2005, quanto às considerações ambientais, indicando que o ambiente deve ser mantido dentro das faixas de valores da Temperatura Bulbo Seco (TBS), umidade e ponto de orvalho, além de especificar qual a variação máxima da TBS por hora. Os requisitos ambientais listados na Tabela 2.7, são descritos como segue:

- **Temperatura de bulbo seco:** Temperatura indicada por um termômetro comum, sem condensação na superfície do bulbo, não exposto à radiação. Seu método inverso (temperatura de bulbo úmido) seria a temperatura indicada por um termômetro cujo bulbo está envolto por um pavio molhado.
- **Variação máxima da TBS:** Valor máximo em que a temperatura de bulbo seco variou nos últimos 60 minutos (ou uma hora).
- **Ponto de orvalho:** Temperatura na qual o vapor d’água contido no ar se condensa quando resfriado a pressão e umidade absoluta constantes.

Tabela 2.7: Requisitos do sistema de refrigeração de DC.

Requisitos	Valores		Normal	Unidades
	Mínimo	Máximo		
TBS	20	25	22	°C
Variação máxima da TBS	0	5	-	°C / hora
Ponto de orvalho máximo	0	21	-	°C
Umidade relativa	40	55	45	%

Fonte: Adaptado de TIA-942 (2005).

- **Umidade relativa:** Relação entre a pressão parcial do vapor d'água e a pressão de saturação do vapor na mesma temperatura.

Observa-se na Tabela 2.7 que as faixas de operação da TBS está entre 20°C e 25°C, estando, portanto, acima dos 18°C, normalmente imaginado como “valor ótimo” por gestores de TI. Um possível resultado da aplicação desta norma técnica é a obtenção de alguma eficiência energética, reduzindo o custo operacional e contribuindo com redução de emissão de CO<sub>2</sub> ao meio ambiente. Resultados complementares são a alta disponibilidade e o aumento da longevidade dos ativos de TI. Manter a umidade dentro da faixa de valores estabelecida, evita-se a corrosão dos circuitos, falha por poeira higroscópica e a eletricidade estática (IBM Knowledge Center, 2013). Isso possibilita aumentar os níveis de confiabilidade do DC, postergando a substituição de equipamentos e reduzindo o lixo eletrônico.

Para avaliar o impacto da eficiência energética obtida com a adoção de uma norma, se faz necessário medir o consumo de energia elétrica dos equipamentos relacionados, bem como medir os parâmetros ambientais para verificar se estão de acordo com o estabelecido. Considerando o estado-da-arte, é indicado que estes parâmetros sejam obtidos em tempo de operação do DC, utilizando-se de um sistema de monitoramento (MAHDAVI, 2014). Além das normas técnicas, existe uma série de boas práticas especificadas em forma de políticas, que visam aos gestores de DCs obterem uma maior eficiência energética. Esta abordagem ocorre em alto nível de especificação e permite ao gestor manter bons hábitos para operação de seus equi-

pamentos e infraestrutura.

## 2.5 Políticas de eficiência energética para DCs

As políticas de eficiência energética são um conjunto de regras, que visam estabelecer boas práticas de gestão aplicáveis à redução do consumo de energia elétrica em DCs. Sua especificidade varia de acordo com as características da organização, desde a atividade-fim desenvolvida até os tipos de equipamentos existentes, e em razão de situações externas, como a localização geográfica da organização e a época do ano. Portanto, deve-se analisar previamente a necessidade e a viabilidade de implementação das práticas propostas.

Especificamente para DCs, existem diversas políticas possíveis de serem aplicadas, como por exemplo, as estabelecidas no documento “*Data Center Master List of Energy Efficiency Actions*”<sup>1</sup>, atualizada periodicamente pelo *Center of Expertise for Energy Efficiency in Data Centers* (CoE) e patrocinada pelo Departamento de Energia dos Estados Unidos (USDE) (U.S. Department of Energy, 2016). Deste documento foram selecionadas duas ações consideradas fáceis de serem colocadas em prática:

1. Configurar a TBS no limite superior da norma; e
2. Utilizar um método do resfriamento gratuito (*free cooling*).

Na primeira, a eficiência energética pode ser obtida configurando o sistema de refrigeração para operar com o TBS próxima ao limite superior estabelecido pela norma adotada, de forma a reduzir o uso do compressor do equipamento de ar condicionado. A segunda é aplicável em regiões geográficas favorecidas por um clima de temperatura média anual abaixo dos limites da norma, consistindo na alternativa de obter o resfriamento gratuito, permitindo assim eliminar ou reduzir significativamente os custos com a climatização. Em DCs, um modo simplificado de aplicar o *free cooling* é utilizar o ar exterior mais fresco que o ar interior, através de exaustores, poupando energia de um modo significativo. Em ambientes pequenos é possível simplesmente abrir as janelas e deixar o ar circular livremente. Todavia, para se certificar que os

---

<sup>1</sup>Disponível em: <https://datacenters.lbl.gov/sites/all/files/DCProMasterList02112016.pdf>.

requisitos ambientais estão sendo satisfeitos, é importante contar com uma solução de monitoramento que permita avaliar se os parâmetros de temperatura, umidade e ponto de orvalho estão dentro das faixas especificadas pelas normas.

Para verificar a efetividade da adoção de determinadas políticas de eficiência energética, também é importante que um sistema de monitoramento possa verificar o impacto que causam no DC como um todo. Uma forma de sintetizar diversas variáveis em apenas uma informação mais concisa, é com o uso de métricas que permitem o monitoramento com base em parâmetros pré-definidos. Deste modo, a identificação do nível em que se encontra o DC em relação a métrica pode ser aferido de modo facilitado, identificando de maneira simples se está dentro dos limites recomendáveis.

## 2.6 Métricas para Data Center

Quando se faz necessário conhecer o impacto energético da utilização dos sistemas de um DC, as métricas podem ser utilizadas como uma ferramenta de avaliação (MURUGESAN; GANGADHARAN, 2012), usando informações como o consumo de energia elétrica necessária para a operação adequada dos equipamentos. Para aferir a eficácia de uma determinada ação, pode-se comparar o valor da métrica antes e depois desta ação. Pode-se considerar como ação, a adoção de métodos que visam reduzir o consumo de energia elétrica, como a utilização de algoritmos mais eficientes, paralelização de recursos, uso de contêineres/máquinas virtuais ou ainda a adoção de determinadas políticas de eficiência energética. Também é comum utilizar o valor destas métricas para comparar diferentes DCs, mas salienta-se que devem possuir o mesmo porte, além de características climáticas externas similares (HOOGENDOORN; GUERRA; ZWAN, 2014). Utilizar uma métrica e divulgá-la indica que a organização importa-se com sua responsabilidade ambiental, agregando valor aos serviços.

Existem diversas métricas que podem ser utilizadas em um DC, conforme pesquisa de Wang et al. (2012), porém devem ser adotadas de acordo com a aplicação do DC. Com a classificação de métricas proposta por Bianzino, Raju e Rossi (2011), pode-se dividir estas métricas em duas categorias:

1. **Nível de instalação:** Considera sistemas consolidados, normalmente composto por diversos equipamentos. Normalmente utilizadas em DCs heterogêneos; e

**2. Nível de equipamento:** Considera a quantidade de energia elétrica e recursos utilizados por cada equipamento com características específicas.

A Tabela 2.8 lista as principais métricas possíveis de serem utilizadas a nível de instalação (1) e de equipamentos (2).

Tabela 2.8: Métricas de eficiência energética.

Nível	Nome	Métrica	Fórmula	Unidade	Observações
1	Power Usage Effectiveness	PUE	$= \frac{\text{Potência Total de Acesso}}{\text{Potência Equipamentos TI}}$	Proporção	Valor varia de 1 ao $\infty$
1	Data Center Infrastructure Efficiency	DCIE	$= \frac{1}{PUE} = \frac{\text{Potência Total de Acesso}}{\text{Potência Equipamentos TI}} * 100\%$	Porcentagem	Valor varia de 0 à 100%
1	Data Center Productivity	DCP	$= \frac{\text{Trabalho Útil}}{\text{Potência Total de Acesso}}$	Proporção	Valor varia de 1 ao $\infty$
2	Energy Consumption Rating	ECR	$= \frac{\text{Consumo Energético}}{\text{Capacidade Efetiva do Sistema}}$	Watt/Gbps	Energia Normalizada para Capacidade
2	ECR-Weighted	ECRW	$= \frac{0,35 * E_f + 0,4 * E_h + 0,25 * E_i}{T_f}$	Watt/Gbps	$E_f$ , $E_h$ e $E_i$ são a energia consumida nas cargas total, meia carga e em espera respectivamente. $T_f$ é a vazão efetiva.
2	Telecommunications Energy Efficiency Ratio	TEER	$= \frac{\sum_{i=1}^m D_i}{\sum_{j=1}^n P_{0j} + P_{50j} + P_{100j}}$	Gbps/Watt	$D_i$ é a taxa de dados de cada interface $i$ ; $P_{0j}$ , $P_{50j}$ , e $P_{100j}$ é a potência do módulo $j$ na utilização de dados em 0%, 50% e 100%.
2	Telecommunication Equipment Energy Efficiency Ratio	TEEER	$= \log \left( \frac{0,35 * P_f + 0,4 * P_h + 0,25 * P_i}{\text{Vazão (Throughput)}} \right)$	$\log(\text{Watt/Gbps})$	$P_f$ , $P_h$ e $P_i$ é a potência consumida em 100%, 50% e 0% de uso da carga (fórmula pode variar para diferentes dispositivos).
2	Consumer Consumption Rating	CCR	$= \frac{E}{\sum A(j)}$	Proporção	$E$ é potência de um dispositivo consumidor da rede; $A$ é provisão de energia por função; $j$ é o conjunto de todos as provisões solicitadas. O valor 1 corresponde a média de um dispositivo.
2	Energy Proportionality Index	EPI	$= \frac{PM - PI}{PM} * 100\%$	Porcentagem	$PI$ é a potência de consumo em modo ocioso, $PM$ é a potência de consumo na carga trabalho máxima.
2	Watts Per VLL	WPVLL	$= \frac{\text{Consumo de Potência}}{\text{Número de VLL}}$	Watt/Linha	Usado para serviços VLL (linha Ethernet ponto-a-ponto) baseado no Número de VLL.
2	Watts Per MAC port	WPMAC	$= \frac{\text{Consumo de Potência}}{\text{Número de portas MAC}}$	Watt/Porta	Usado para serviços de endereços <i>Media Access Control</i> (MAC) (Ethernet-LAN multiponto) baseado no número de portas MAC.
2	Power Consumption Per Line of Broadband	P <sub>BLine</sub>	$= \frac{P_{BBeq}}{\text{Qtdd de Sublinhas}}$	Watt/Porta	$P_{BBeq}$ é a potência de consumo do equipamento de banda larga equipado, Qtdd de Sublinhas é o máximo de linhas suportadas.
2	Normalized Power Consumption	NPC	$= \frac{1000 * P_{BLine}}{\text{Taxa de Bits} * \text{Comprimento da Linha}}$	Watt/Mbps*Km	Consumo de energia normalizado por linha, para equipamentos de rede de banda larga baseado na capacidade da linha.
2	HVAC System Effectiveness (WANG; KHAN, 2011)	HVACSE	$= \frac{IT}{HVAC + (\text{Combust.} + \text{Vapor} + \text{Água Resfr.}) * 293}$	Proporção	Energia consumida de cada variável ao ano

Fonte: Adaptado de (WANG et al., 2012).

Nas métricas a nível de instalação (1) é possível observar que as fórmulas são genéricas, não apresentando aspectos em relação à aplicações específicas do DC. Já a nível de equipamento (2), são necessários os dados inerentes à sua aplicação, como a capacidade do sistema, taxa de dados, potência, Virtual Leased Line (VLL) e números de portas.

Com a intenção de abranger diversos tipos de DC e devido a heterogeneidade dos diversos tipos de equipamentos que os compõem, são utilizadas neste trabalho apenas as duas primeiras métricas listadas na Tabela 2.8: *Power Usage Effectiveness* (PUE) e *Data Center Infrastructure Efficiency* (DCiE). Um outro fator que influencia na decisão do uso destas métricas é a sua grande aceitação no meio científico e comercial (GENG, 2014; KHAN; ZOMAYA, 2015).

O PUE é desenvolvido pela *The Green Grid Association* em conjunto com a *American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers* (ASHRAE) nos Estados Unidos. De forma geral, é uma métrica usada para quantificar a efetividade com que um DC resfria e fornece energia para os servidores, considerando juntamente o uso dos demais sistemas de suporte (PEGUS II et al., 2016). O PUE pode ser considerado como uma métrica de “eficácia”, uma vez que o desempenho dos servidores não está incluído no cálculo. Destaca-se, portanto, como um grande benefício ser abrangente e de baixa complexidade. As Equações 2.1 e 2.2 mostram as variáveis que compõem o PUE e o DCiE.

$$PUE = \frac{P_{total}}{P_{TI}} \quad (2.1) \quad DCiE = \frac{1}{PUE} * 100\% \quad (2.2)$$

Na equação 2.1, a variável  $P_{total}$  é a potência total de acesso, i.e., toda a energia elétrica consumida pelo DC, enquanto a variável  $P_{TI}$  é a potência consumida exclusivamente pelos equipamentos de TI. Os valores do PUE variam de 1 ao infinito, sendo que quanto mais próximo de 1, mais eficiente é o DC. Na Equação 2.2, a métrica DCiE é a transformação do valor do PUE para uma taxa que varia de 0% a 100% e quanto maior este valor, mais eficiente é o DC.

As grandes empresas como Google e Facebook são uma ótima referência, apresentando os melhores valores do PUE. No primeiro trimestre de 2016, os DCs da Google<sup>2</sup> apresentam um PUE médio de 1,11 pontos. Por sua vez, os dois DCs do Facebook<sup>3</sup> registraram um PUE de 1,09 pontos no último trimestre de 2015.

Existem outras métricas, além das especificadas, que fornecem índices relacionados à eficiência energética (WANG; KHAN, 2011), mas que não são o foco deste trabalho. Para definir os valores das variáveis das métricas selecionadas, se faz necessário utilizar um sistema de monitoramento que permita obter o consumo de ener-

<sup>2</sup>Fonte: <https://www.google.com/about/datacenters/efficiency/internal>

<sup>3</sup>Fonte: <https://www.facebook.com/PrinevilleDataCenter/app/399244020173259>

gia dos dois tipos principais tipos de sistemas que compõe um DC: sistemas computacionais e de suporte, além de monitorar outros parâmetros, como as informações ambientais.

## 2.7 Soluções correlatas de monitoramento

Tipicamente, o sistema de monitoramento ambiental voltado à DC faz parte de uma plataforma maior, dedicada ao gerenciamento completo da infraestrutura de um DC, denominada *Data Center Infrastructure Management* (DCIM) (WIBOONRAT, 2014). Esta plataforma permite ao gestor obter uma visão holística de todos os processos de um DC em tempo de operação, como a utilização de recursos e verificação dos pontos críticos, facilitando a análise e planejamento de mudanças quando apropriado. A aplicação deste tipo de ferramenta de automação é recente em DC, sendo o DCIM visto como uma solução técnica e de negócio. Solução técnica, por permitir a análise dos dados monitorados, e de negócios por visar a redução de custos e aumento do desempenho do DC (FILHO; NETO, 2012).

Com uma expectativa de utilização de 60% de plataformas DCIM em DCs para 2015 (NETO, 2013b), empresas de TI de renome lançaram suas soluções para se posicionar neste mercado. Destacam-se as multinacionais Emerson Network Power<sup>4</sup>, Schneider Electric<sup>5</sup>, Nlyte Software<sup>6</sup>, Commscope<sup>7</sup>, Panduit<sup>8</sup> e Fazion<sup>9</sup>. No entanto, não foi possível identificar uma definição de líderes de mercado deste segmento.

Estas plataformas DCIM são normalmente indicadas para utilização em DCs de médio a grande porte, com centenas a milhares de servidores. Seu grande foco está no gerenciamento dos recursos do DC como um todo, que pode variar desde a organização do espaço físico, utilizando representação gráfica em três dimensões (3D), até a definição de regras de negócio relacionadas a TI (BEAMISH, 2012).

Em uma pesquisa realizada pelo Uptime Institute (STANSBERRY, 2013), cerca de um terço das organizações relataram desinteresse na aquisição de uma plataforma

---

<sup>4</sup>Trellis - <http://www.emersonnetworkpower.com>

<sup>5</sup>InfraStruXure - <http://www.schneider-electric.com>

<sup>6</sup>Nlyte - <http://www.nlyte.com>

<sup>7</sup>iTracks CPIM - <http://www.itracs.com>

<sup>8</sup>SynapSense - <http://www.synapsense.com>

<sup>9</sup>DataFaz - <http://www.datafaz.com>

DCIM, dado seu alto custo de aquisição e integração deficiente com sistemas legados. Entretanto, mesmo para uma pequena sala de servidores, é importante manter o monitoramento dos parâmetros climáticos para manter a disponibilidade, confiabilidade e a segurança dos serviços de TI. Focando apenas nesta demanda, existem produtos que fornecem soluções específicas para monitoramento ambiental de DC, com diferentes abordagens entre si quanto aos métodos de sensoriamento e especificações de hardware e de software. Seguem a mesma tendência das plataformas DCIM, sendo soluções proprietárias em sua grande maioria, porém foram encontradas algumas soluções *open source* e de baixo custo.

### 2.7.1 Soluções Proprietárias

Produtos proprietários tendem a criar o aprisionamento tecnológico (*vendor lockin*) com o uso de tecnologias e protocolos próprios, sem documentação técnica disponível e incompatibilidade com outros tipos de produtos/tecnologias. Um exemplo básico se dá quando ocorre a necessidade de expandir um sistema de monitoramento existente, sendo necessário a aquisição de novos módulos somente pelo mesmo fabricante. Demais características negativas de soluções proprietárias podem ser destacadas ao compará-las com os benefícios de se utilizar ferramentas com licença abertas, como descrito na Seção 2.7.2. Entre os possíveis benefícios de uma solução proprietária, destaca-se o suporte técnico, normalmente com um custo adicional relativo ao serviço, além da garantia fornecida pelo fabricante, que em alguns países é obrigatória.

Existem diversas abordagens para realizar o monitoramento de um ambiente de sala de servidores, variando entre os tipos de sensores e atuadores, protocolos de comunicação e tipo de informação provida. Dentre os tipos sensores encontrados, pode-se classificar em três categorias básicas:

- Ambiental: analisando parâmetros como temperatura, umidade, fluxo de ar (por pressão atmosférica), ponto de orvalho, poeira, etc.
- Segurança: com parâmetros de incêndio (fumaça e chamas), inundação, vibração, invasão (sensor de movimento, aberturas de acesso à sala e aberturas de *racks*).
- Energia: usados para medir a qualidade do fornecimento e o consumo de ener-



gia elétrica através da análise da corrente e tensão elétrica. É aplicado aos equipamentos de TI e equipamentos de suporte.

Dentre os atuadores, encontram-se basicamente, as travas de segurança, acionadores de sistemas de incêndio, relés e notificação por alarmes. Os principais meios de comunicação encontrados são rede sem fio (*wireless*), com uso dos protocolos da família IEEE 802.11 (Wi-Fi), IEEE 802.15.4 (ZigBee) e WirelessHART, e meio de comunicação guiada por cabos Ethernet, normalmente com os protocolos comumente usados em sistemas de automação, como o *Simple Network Management Protocol* (SNMP), TCP/IP, etc.

Em sua maioria, estes sistemas de monitoramento fazem uso de padrões específicos de sensores, hardware, software e protocolos de comunicação. Desse modo, possuem escalabilidade e adaptabilidade restritas aos recursos oferecidos pelos fabricantes em relação a outros tipos de sensores possíveis de serem utilizados. Enquanto parâmetros como temperatura e umidade estão presentes em todas as soluções, a análise de pressão do ar é relevante para encontrar deficiências na refrigeração (ARGHODE et al., 2015) e o consumo de energia elétrica por equipamento é relevante para análise da eficiência do DC através das métricas. Um tipo solução que possibilite ao gestor incluir de novos componentes ou modificá-los, são os sistemas baseados em licenças de código fonte aberto, ou *open source*.

## 2.7.2 Soluções Open Source

Tecnologias *open source* tem ganhado notoriedade nos últimos anos, sendo cada vez mais aplicadas em setores privados e públicos (JOKONYA, 2015), dada a desmistificação de conceitos ultrapassados e por ficar mais aparente os benefícios que permeiam o seu uso. Dentre estes benefícios, destacam-se a independência tecnológica, segurança da informação, personalização, adaptação, expansão, custo reduzido de implantação e interoperabilidade por serem tipicamente baseadas em padrões abertos (JOKONYA, 2015; CONGDON, 2015). Com a popularização do uso de ferramentas desenvolvidas sob licenças livres, é possível encontrar conceitos de um produto comercial em uma solução *open source*, seja esta solução em software ou hardware, resolvendo os mesmos problemas que uma solução proprietária se propõe a resolver (BALTER, 2015). É possível encontrar soluções que utilizam software *Open Source* com hardware pro-

prietário e vice-versa, mas também é possível ter soluções em que ambos, software e hardware, sejam de licenças livres.

Uma das formas encontradas por gerentes de TI que desejam investir pouco em um sistema de monitoramento específico para seu ambiente de DC, é elaborar a sua própria solução, recorrendo à comunidade *open source* na tentativa de encontrar os projetos mais adequados às suas necessidades de acordo com seu DC. Foram identificadas poucas soluções totalmente *open source* documentadas até o momento, voltadas especificamente ao monitoramento dos parâmetros ambientais e energéticos da sala de servidores de um DC. Sendo o foco deste trabalho o uso de hardware e software *open source*, foram identificadas apenas as soluções que enquadram-se nestes mesmos critérios:

- SproutBoard;
- Envmon;
- TomBox;
- Rodriguez et al. (2011); e
- Goldhar (2009).

### **SproutBoard**

A SproutBoard<sup>10</sup> oferece uma solução simples, fornecendo uma ferramenta básica para verificar temperatura e umidade. Utiliza-se de uma placa de circuito impresso, que também funciona como um chassis, adaptando-se ao *rack* de servidores. Neste chassis estão as portas de extensão para a conexão dos sensores suportados. Esta solução utiliza um MCU Arduino e uma *shield* Ethernet para comunicação dos dados com alguma ferramenta externa. Na documentação encontrada, está restrita a exemplificação com uso de sensores de temperatura, umidade e ruído. Na implementação do programa do MCU, está a interface que permite visualizar os dados através de uma página HTML estática, usando um navegador web em um computador ligado à rede local.

---

<sup>10</sup><http://www.sproutboard.com>

### Envmon

A EnvMon<sup>11</sup> utiliza conceitos similares ao da solução SproutBoard. Contudo, esta opção se utiliza de um computador Raspberry Pi em cada nodo da rede de sensores, sendo os dados armazenados localmente, mas conectando-se à rede guiada por Ethernet. Para visualizar os dados armazenados, é utilizando o software de *datalogging* RRDtool, em outro computador conectado à rede local. Segundo a documentação disponível, a solução ainda pode ter alguma evolução em projetos futuros através da expansão de portas para adicionar novos sensores.

### TomBox

A TomBox<sup>12</sup>, utiliza o software de monitoramento Zabbix<sup>13</sup> para armazenar e visualizar os dados coletados. Utiliza Arduino nos nodos de sensores conectado em uma rede guiada usando Ethernet. A documentação sugere alguns exemplos de implementação para o Arduino e algumas opções de sensores.

### Rodriguez *et al.* 2011

A solução encontrada com mais recursos é a apresentada por Rodriguez et al. (2011), com o uso de uma RSSF com protocolo ZigBee e nodos compostos por MCU Arduinos. O software implementado para a gerenciar os dados e gerar os gráficos utiliza a linguagem do MatLab, sendo esta uma linguagem proprietária. Embora se utilize de ferramentas *open source* (com exceção da linguagem MatLab), não foi encontrada nenhuma documentação relacionada, que esteja disponível na Internet, além do artigo publicado.

### Goldhar 2009

A dissertação de mestrado de Goldhar (2009) mostra o protótipo de uma ferramenta de gestão baseada no *framework* desenvolvido pelo autor. Este trabalho aplica as métricas já consolidadas na indústria e propõe novas métricas complementares. Para

---

<sup>11</sup><http://www.bigi.com/wiki/Envmon>

<sup>12</sup><http://marco.guardigli.it/2010/05/arduino-in-datacenter-rack.html>

<sup>13</sup> <http://www.zabbix.com>

coletar os dados para sua pesquisa, o autor usa registradores comerciais de energia com *datalogging* e, em alguns casos, também realiza a coleta manual com alicates amperímetros em pontos de difícil acesso. Estes dados relativos ao consumo de energia tiveram que ser inseridos manualmente em uma base de dados, a qual as consultas são feitas diretamente através de *queries*. O autor relata que esta foi a principal dificuldade encontrada em sua pesquisa, pois além da inexistência de verificações automáticas por sensores, os resultados podem ter sofrido uma perda relativa de acurácia, já que os períodos entre as leituras eram demasiadamente longos (no mínimo a cada 10 minutos). Como resultados de seu estudo de caso, o autor relata que o PUE é de 1,99 e o DCiE de 50,12% em seu estudo de caso.

### 2.7.3 Comparação dos trabalhos correlatos

A Tabela 2.9 visa comparar todos os trabalhos correlatos identificados, usando como base: o protocolo utilizado na comunicação entre os nodos, software para visualizar os dados monitorados, equipamento responsável pela consolidação dos dados coletados e o microcontrolador empregados nos nodos. Além destas características, a Tabela 2.9 relaciona se as soluções fornecem informações sobre métricas, se usa alguma norma para DCs e quais parâmetros são analisados.

Tabela 2.9: Soluções *open source* de monitoramento da sala de servidores.

Requisitos	SproutBoard	EnvMon	Rodriguez et al. (2011)	TOMBOX	Goldhar (2009)
<b>Protocolo</b>	Ethernet	Ethernet	ZigBee	Ethernet	Nenhum
<b>Software</b>	Página HTML	RRDtool	MatLab	Zabbix	Banco de dados
<b>Processamento</b>	PC	Raspberry Pi	PC	PC	PC
<b>Tipo MCU</b>	Arduino	Arduino	Arduino	Arduino	Nenhum
<b>Conformidade com normas</b>	Não	Não	Não	Não	Não
<b>Informa PUE</b>	Não	Não	Não	Não	Sim
<b>Indica temperatura</b>	Sim	Sim	Sim	Sim	Não
<b>Indica umidade</b>	Sim	Sim	Sim	Sim	Não
<b>Indica pressão atm.</b>	Não	Não	Não	Não	Não
<b>Indica consumo de energia</b>	Não	Não	Não	Não	Sim

Fonte: O próprio autor.

Ao analisar a Tabela 2.9, verifica-se que nenhuma das opções identificadas faz a análise de parâmetros ambientais que vão além de temperatura e umidade, como a pressão e o ponto de orvalho por exemplo. A análise de critérios de segurança, como fumaça, também não foram encontrados em nenhum dos trabalhos correlatos. O consumo de energia elétrica dos equipamentos foi relatado em apenas um trabalho, porém não é oferecida nenhuma solução de hardware que realize o monitoramento e a coleta de dados forma automatizada. A solução que analisa o consumo energético é a única que fornece informações sobre as métricas PUE e DCiE. Nenhuma das soluções citam as normas para DC como uma referência de valores operacionais, dificultando na escolha de sensores específicos para este tipo de ambiente.

Apenas uma solução utilizando conceitos de RSSF (RODRIGUEZ et al., 2011), outra (TomBox) que faz uso de ferramenta de software robusta de monitoramento, como o Zabbix e outra (EnvMon) que usa um processamento em Raspberry Pi. Porém, nenhuma das soluções encontradas fazem uso de todos estes critérios em uma só solução. Tais critérios possuem características que são adequadas a serem aplicadas em um sistema de monitoramento de sala de servidores, podendo variar entre especificações, mas mantendo-se dentro dos requisitos considerados importante para um ambiente de DC.

## 2.8 Considerações Parciais

Neste capítulo foram descritos os principais conceitos relacionados à DCs, estabelecendo-se da parte conceitual, bem como as classificações utilizadas ao longo do trabalho. Foi identificado o panorama atual das organizações e quais as suas principais deficiências, mostrando as normas e políticas que devem ser consideradas ao projetar e operar um DC. Após identificar as métricas factíveis de serem utilizadas em DCs heterogêneos, foram escolhidas duas: PUE e DCiE.

Para obter os valores destas métricas, se faz necessário o uso de um sistema de monitoramento, sendo listados as principais soluções disponíveis no mercado e alguns trabalhos relacionados sob licenças livres. Com uma divisão destes sistemas de monitoramento pelo critério de licença de uso, foi estabelecido que sistemas abertos (software e hardware) são capazes de trazer benefícios aos gestores de

organizações de pequeno porte. Por fim, sendo destacadas algumas soluções neste critério e comparadas entre si, concluiu-se que não foi encontrada uma solução de monitoramento ambiental e energético *open source* que possa ser tão completa quanto as soluções proprietárias.

## 3 Análise de requisitos e definição dos componentes da solução

A especificação de requisitos da solução proposta visa fornecer diretrizes para o desenvolvimento de uma solução de monitoramento de forma organizada, reconhecendo as informações necessárias para o projeto e implementação, assim como para a realização dos testes. Neste capítulo, são especificados os principais requisitos funcionais e não funcionais, focando não somente no usuário que utilizará a solução, mas também relacionando as funcionalidades de software e de hardware, as capacidades da solução, os recursos disponíveis, os benefícios e os critérios de validação. São também destacados alguns componentes de software e hardware existentes, eleitos para comporem a solução final, sendo verificado ao final se estes componentes satisfazem os requisitos previamente levantados.

### 3.1 Documento de requisitos

Para ter a habilidade de antecipar e gerenciar mudanças de uma solução durante o período de desenvolvimento, é necessário utilizar os conceitos relativos a Engenharia de Software para desenvolver um documento de requisitos, mostrando as principais finalidades da solução, requisitos funcionais (funcionalidade) e não funcionais (qualidades). Este documento deve ser usado como referência em todas as fase de desenvolvimento da solução final, visando gerenciar o projeto de forma eficiente e aumentar a qualidade dos testes e manutenção do sistema.

Todos os requisitos funcionais e não funcionais estão categorizados em três níveis de prioridades, ficando o estabelecido:

- Essencial: Este tipo de requisito deve ser implementado para que o sistema funcione
- Importante: Sem este requisito o sistema pode funcionar, mas não da maneira esperada, ou de acordo com as propriedades estabelecidas.

- **Desejável:** Este tipo de requisito não compromete o funcionamento do sistema, mas é interessante considerá-lo.

### 3.1.1 Finalidade da solução proposta

A solução proposta deve prover um sistema de monitoramento para DC baseada em plataformas de software e hardware livres. A solução deve fornecer informações dos parâmetros ambientais da sala de servidores, como temperatura, umidade e pressão atmosférica, bem como informações do consumo de energia dos equipamentos que compõem este ambiente. A solução deve possibilitar ao gestor de TI atuar com maior precisão em medidas de eficiência energética e permitir avaliar o impacto na adoção de políticas orientadas à redução de custos de energia elétrica, possibilitando aumentar a longevidade dos ativos de TI.

### 3.1.2 Requisitos Funcionais

Os requisitos funcionais estão diretamente ligados à funcionalidade do software e descrevem o que o sistema deve fazer.

**RF-01: Coletar dados:** Os dados do ambiente devem ser coletados através de sensores compatíveis com a faixa de valores comuns ao tipo de ambiente. Estes dados podem ser provenientes de diversos parâmetros, tais como: temperatura, umidade, pressão atmosférica e consumo de energia. Prioridade: Essencial.

**RF-02: Armazenar dados:** As informações coletadas devem ser armazenadas em uma base de dados, de forma que possa ser facilmente consultada, de forma direta ou indireta, quando for necessário. Prioridade: Essencial.

**RF-03: Disponibilizar dados:** As informações armazenadas devem estar disponíveis para o usuário, de forma que possibilite selecionar o tipo de dado a ser consultado. Prioridade: Essencial.

**RF-04: Visualizar dados em gráficos:** Devido ao grande volume de dados coletados, a solução deve possibilitar a visualização destes dados através de gráficos, que permitam obter de forma resumida o comportamento deste parâmetro em um período de tempo selecionado. Prioridade: Importante.



- RF-05: Visualizar dados por resumos:** Uma outra abordagem de visualização dos dados é mostrar de forma resumida o valores médio, mínimo e máximo dentro de um período determinado de tempo. Portanto esta informação deve estar disponível para o usuário. Prioridade: Importante.
- RF-06: Personalizar os gráficos:** Um gráfico de dados deve estar de acordo com a natureza da informação. Portanto a solução deve disponibilizar meios de personalizar o tipo de gráfico, bem como editar as informações deste gráfico. Prioridade: Desejável.
- RF-07: Criar alertas:** Alertas são úteis para avisar ao usuário os casos definidos como críticos, desta forma, o sistema deve possibilitar ao usuário que crie alertas para o parâmetro desejado, através de sua interface. Prioridade: Desejável.
- RF-08: Alertar usuários:** Caso um parâmetro ultrapasse algum limite pré estabelecido pelo usuário, o sistema deverá emitir um alerta. Este alerta pode ser uma alarme no local, um e-mail, SMS ou notificação por outras ferramentas de comunicação remota. Prioridade: Desejável.
- RF-09: Adicionar nodos:** Novos nodos de sensores devem ser adicionados de forma simples e automática, desde que esteja de acordo com as credenciais de segurança adotada pela solução. Prioridade: Importante.
- RF-010: Adicionar/Modificar/Remover sensores:** A solução deve possibilitar a modificação ou adição de novos sensores (mesmo que não tenham sido previamente testados), de modo a minimizar as restrições ao usuário proveniente das tecnologias usadas, sendo possibilitado o uso de novas bibliotecas para diversos sensores. Prioridade: Importante.
- RF-011: Modificar o tempo entre leituras dos sensores:** Os nodos devem ser desenvolvidos de forma a ser possível configurar o tempo entre leituras dos sensores. Portanto, o usuário deverá estabelecer o grau de precisão das informações coletadas, permitindo regular a frequência de dados recebidos por cada nodo. Prioridade: Desejável.
- RF-012: LEDs de *status* nos nodos:** Os nodos de sensores devem ter *Light Emitting Diode* (LED) multicoloridos, para permitir ao usuário identificar seu estado de operação de forma visual. Prioridade: Desejável.

- RF-013: Tamanho dos nodos:** Os nodos devem ter um tamanho reduzido, de forma a facilitar a distribuição e instalação em locais de difícil acesso. Prioridade: Importante.
- RF-014: Comunicação entre nodos:** A comunicação entre os nodos deve ser concebida de forma a não necessitar de cabeamento. Portanto, deve ser feita preferencialmente sem fios e por protocolos de baixo consumo de energia. Prioridade: Importante.
- RF-015: Consumo de energia dos componentes de hardware:** Todos os componentes de hardware devem ser de baixo consumo de energia, possibilitando o uso de baterias ou fontes de transformação de baixo custo. Prioridade: Desejável.

### 3.1.3 Requisitos Não Funcionais

- RNF-01 Escalabilidade:** A solução deve prover a adição automática de novos nodos de sensores, devendo esta quantidade ser limitada apenas pelo máximo de endereços possíveis do protocolo utilizado. Prioridade: Importante.
- RNF-02 Segurança:** A transferência de dados da RSSF deve prever a utilização de algoritmos de criptografia, de forma a impedir que invasores tenham acesso a rede. Prioridade: Desejável.
- RNF-03 Resiliência:** Os nodos devem ter capacidade de auto-recuperação em caso de ciclos infinitos de execução, erros nas bibliotecas dos sensores ou outros erros de software. Os algoritmos do nodo de processamento central devem manter-se em execução, prevendo os casos de encerramento inesperado. Prioridade: Importante.
- RNF-04 Usabilidade:** A solução deverá estar voltada para todos os perfis de usuários, possibilitando configurar o sistema e visualizar os dados de forma fácil e intuitiva. Prioridade: Desejável.
- RNF-05 Portabilidade:** A solução deverá ser acessada por qualquer dispositivo: computadores, Tablets, Smartphones e Smart TVs. Estima-se que para atingir esta qualidade, a solução deverá ser multiplataforma, possibilitando ao usuário aces-

sar a interface de visualização dos dados independente do sistema operacional, mas utilizando login e senha. Prioridade: Importante.

**RNF-06 Manutenibilidade:** Devido o uso contínuo dos componentes de hardware da solução, deverá ser considerado a troca rápida e simples destes componentes, de forma a manter a solução em alta disponibilidade. São exemplos de componentes de hardware: sensores, nodos controladores, dispositivos de comunicação, central de processamento e armazenamento, todavia, esta tecnologia deve ser independente de fornecedor. Prioridade: Importante.

**RNF-07 Liberdade com software e hardware *open source*:** A solução deverá ser totalmente desenvolvida utilizando componentes de software e hardware livres, visando benefícios para o usuário e para a continuidade do próprio sistema. Prioridade: Importante.

**RNF-08 Flexibilidade:** A solução de monitoramento deve prover a flexibilidade para uma possível alteração dos pontos de coletas dos nodos, evitando a necessidade de cabeamento para enviar os dados para a base de dados. Prioridade: Importante.

**RNF-09 Disponibilidade:** O sistema deve ser desenvolvido com o objetivo de manter-se em execução contínua (24/7). Isso é necessário pois o ambiente de DC também opera continuamente. Prioridade: Essencial.

**RNF-010 Normatização:** A solução deve utilizar-se de normas técnicas pré-estabelecidas, permitindo ao usuário manter seu ambiente de aplicação também de acordo com as normas. Prioridade: Importante.

**RNF-011 Custo de aquisição dos componentes:** Os componentes da solução proposta devem ter seu custo de aquisição reduzidos (hardware) ou nenhum custo (software), para a viabilizar a aquisição pelos interessados em replicar o projeto. Prioridade: Desejável.

**RNF-012 Presença de mercado:** Os componentes da solução proposta devem ser selecionados com foco em disponibilidade de mercado, permitindo a aquisição ou substituição se forem componentes de hardware, e para *download*, se forem componentes de software. Prioridade: Desejável.

## 3.2 Componentes de software e hardware livre da solução proposta

A análise de requisitos, realizada na Seção 3.1, tornou mais evidente a análise dos componentes que podem constituir a solução proposta. Contudo, o requisito não funcional RNF-07, que especifica o uso de software e hardware livres, impacta diretamente na seleção de quais tecnologias comporão a solução proposta como um todo. O levantamento das soluções correlatas, realizado na Seção 2.7, permitiu obter um ponto de vista crítico sobre as restrições que estas soluções continham, permitindo utilizar parcialmente as ideias que agregavam resultados. Cruzando esta base obtida com a análise de requisitos, foi possível formar um conjunto de componentes de software e hardware candidatos a formarem a solução GreenHop. Elege-se o uso de uma RSSF para reduzir a necessidade de cabos (WIBOONRAT, 2014; ABBAS; OROZCO; VILLALBA, 2015), uso de MCUs para aquisição de diversos dados, computadores *single board* que realizam o processamento de forma a não depender de um outro computador da rede (RAGUVARAN; THIYAGARAJAN, 2015; MATSUMOTO et al., 2013) e soluções de software capazes de gerenciar todas as informações geradas em tempo de operação do DC.

O processo de tomada decisão dos componentes de hardware e software foi baseado em uma breve pesquisa (FERNANDEZ, 2013), que verificou inicialmente sua presença de mercado (facilidade de encontrar), selecionando apenas componentes de qualidade satisfatória, que opere nas faixas de valores de um ambiente de DC, com valor de aquisição relativamente baixo, facilidades de uso e de implementação. Por tratar-se da implementação de uma solução totalmente *open source* e com base no RNF-07, os componentes escolhidos devem também ter a mesma licença.

### 3.2.1 Protocolos de comunicação

Existem diversos módulos de comunicação possíveis de serem utilizados em automação, podendo ser divididos entre meio guiado (cabos) e sem fio. Dentre os módulos sem fio, as opções IEEE 802.15.4 (ZigBee), IEEE 801.11 (Wi-Fi), Bluetooth, Wireless-Hart, 6LowPAN e ou ainda comunicação diretamente por Rádio Frequência (RF) (sem

protocolo definido), tornam-se atrativas devido sua intensa aplicação industrial (LI; THAI; WU, 2008). Foi escolhido o protocolo ZigBee, por possuir como diferenciais o baixo consumo de energia, prover mecanismos de comunicação segura e formação de topologia em malha (KOHVAKKA et al., 2006; RODRIGUEZ et al., 2011; PARK et al., 2013). Dentre os tipos de hardwares que utilizam este protocolo, foi selecionado o rádio XBee Série 2, com antena *wire* e potência de 1Ghz, salientando o seu tamanho reduzido, disponibilidade no mercado e baixo consumo e baixo valor de aquisição. Um outro fator importante é possuir compatibilidade com Arduino através do uso de *shields* e também por possuir bibliotecas que permitem utilizar o protocolo em modo de aplicação (API) do ZigBee. Estas bibliotecas são utilizadas no microcontrolador e na linguagem de programação (Python) usada no nodo coordenador da RSSF.

### 3.2.2 Microcontroladores

O Microcontrolador (MCU) é utilizado para realizar a conversão analógico/digital de diversos tipos de sensores e atuadores. Existem diversas plataformas de prototipagem *open source* que facilitam o uso de MCU por placas de circuito impresso com proteção de sobrecarga de corrente e interfaces para facilitar a conexão com as portas de entrada e saída do circuito. Soluções que utilizam diferentes MCUs são: Galileo (MCU da Intel), Pinguino (MCU da PIC) e Arduino (com derivados em MCU da ATMEL). Dentre estas opções, foi escolhida a plataforma Arduino<sup>1</sup> devido a experiência prévia do autor, por ser uma plataforma amplamente disponível no mercado e ser globalmente difundida. O Arduino permite a programação em linguagem C++ com diversas bibliotecas documentadas, facilitando o uso da maioria dos sensores/atuadores existentes para este tipo de plataforma (SEVERANCE, 2014). O Arduino foi concebido de forma a minimizar a necessidade de conhecimento em programação e eletrônica, dada as extensões em circuito impresso denominadas *shields*, que permitem ao usuário focar apenas na implementação da lógica geral do protótipo. Normalmente, o Arduino é utilizado em conjunto com uma unidade de processamento com maior capacidade (*e.g.*, computador) para armazenamento e visualização da informações geradas, podendo ser conectado por cabo USB, cabo Ethernet, ou comunicando-se sem fio, como os protocolos de comunicação já citados.

---

<sup>1</sup><http://www.arduino.cc>

### 3.2.3 Unidade de processamento

Para processar os dados recebidos através da RSSF, é necessário que uma unidade de processamento possa armazenar estes dados para posterior consulta. Com o objetivo de prover uma solução *turn-key*, computadores de placa única (ou *single board computer*) tornam-se uma solução portátil, de baixo consumo de energia e economicamente acessível. Baseados no conceito de *System on a Chip* (SoC), cada modelo varia de acordo as características relativas à capacidade de processamento, memória RAM, memória não-volátil e tipos de portas para conectividade (USB, rede, GPIO, SATA, etc). Os modelos com maior facilidade de encontrar no mercado são Raspberry Pi<sup>2</sup>, Banana Pi<sup>3</sup>, Beagle Bone<sup>4</sup> e Cubieboard<sup>5</sup>. Foram testados os três primeiros, sendo eleito o Banana Pi por suportar a carga computacional necessária para o software de monitoramento Zabbix e ao MySQL. A porta SATA presente no Banana Pi também é um diferencial para sua escolha, sendo utilizada para conectar uma unidade externa de armazenamento (HD/SSD), ao invés do cartão de memória SD, pois a quantidade de leituras e escritas do banco de dados pode reduzir drasticamente o tempo de vida do cartão de memória, além de fornecer maior capacidade de armazenamento.

### 3.2.4 Sistema operacional & linguagens de programação

Existem diversas opções de Sistemas Operacionais (SO) otimizados para plataforma ARM, mas foi selecionado o Raspbian Versão 3.0 para o Banana Pi, por ser baseado em uma versão estável do GNU/Linux Debian 7 (Weezy) e ser um SO também utilizado em outras plataformas, portanto, provido de vasta documentação. Existem várias opções para linguagem de programação dos *scripts*, podendo ser empregado *shell script*, JavaScript, Python, dentre outras. Contudo a linguagem Python foi selecionada devido ao fato de já possuir disponível diversas bibliotecas para trabalhar com os protocolos e hardwares escolhidos. Destacam-se as bibliotecas que permitem trabalhar com o protocolo ZigBee, e para comunicação com Zabbix, usando a notação JSON.

---

<sup>2</sup>Atenta-se que o SoC é proprietário, <http://www.raspberrypi.org>

<sup>3</sup><http://www.lemaker.org>

<sup>4</sup><http://beagleboard.org>

<sup>5</sup><http://cubieboard.org>

### 3.2.5 Software de monitoramento

Os softwares típicos de uma solução DCIM possuem diversas ferramentas além da monitoração dos parâmetros ambientais (Seção 2.7). Porém, devido ao foco deste trabalho estar apenas no monitoramento ambiental e de consumo energético, procurou-se um tipo de software que já seja utilizado por gestores de TI de pequenas empresas, para que a solução proposta seja integrada às ferramentas em uso, evitando o inconveniente de se ter mais uma ferramenta. Ferramentas de monitoramento de rede como o Zabbix, Cacti<sup>6</sup> e Nagios<sup>7</sup> são soluções *open source* amplamente utilizadas em corporações em todo o mundo. Possuem um padrão de qualidade e operacionalidade reconhecidos mundialmente (MESCHERYAKOV; SHCHEMELININ; EFIMOV, 2014) e automaticamente atuam sobre falhas do sistema a partir das *triggers* pré-configuradas como alarmes pelos usuários. Essas ferramentas são empregadas para gerenciar, armazenar e exibir os dados da rede monitorada, fornecendo visualização por gráficos personalizáveis para mostrar os dados em tempo de operação, além das ferramentas de alerta para notificação remota via SMS e e-mail (MARIK; ZITTA, 2014). Foi selecionada a ferramenta Zabbix (versão 2.4.3) por preencher os requisitos básicos de hardware, permitindo executar os módulos: *Zabbix Server*, *Agent* e *front-end Web* sem problemas iniciais com o processamento, memória e armazenamento, restritos no Banana Pi.

## 3.3 Satisfação dos componentes pelo documento de requisitos

Para verificar se as escolhas dos componentes de software e hardware que irão compor a solução GreenHop, estão coerentes com a problemática levantada, é proposto na Tabela 3.1 uma relação entre os componentes eleitos, os requisitos funcionais e não funcionais levantados na Seção 3.1. Cada componente deve, ao menos, ter um requisito em sua linha, e todos os requisitos devem estar relacionados na tabela.

Observa-se uma distribuição homogênea da maior parte dos requisitos entre os componentes. Isto ocorre devido ao fato de o documento de requisitos ter sido

---

<sup>6</sup><http://www.cacti.net>

<sup>7</sup><http://www.nagios.org>

Tabela 3.1: Relação de requisitos satisfeitos com as escolhas de componentes.

Componente	Requisitos Funcionais	Requisitos Não-Funcionais
<b>ZigBee</b>	RF-01 RF-09, RF-12, RF-13, RF-14, RF-15	RNF-01, RNF-02, RNF-03, RNF-06, RNF-07, RNF-08, RNF-09, RNF-11, RNF-12
<b>Arduino</b>	RF-01, RF-09, RF-10, RF-11, RF-12, RF-13, RF-14, RF-15	RNF-06, RNF-07, RNF-08, RNF-09, RNF-11, RNF-12
<b>Banana Pi</b>	RF-02, RF-08, RF-12, RF-13, RF-14, RF-15	RNF-03, RNF-06, RNF-07, RNF-08, RNF-09, RNF-11, RNF-12
<b>GNU/Linux</b>	RF-02	RNF-03, RNF-05, RNF-06, RNF-07, RNF-09, RNF-11, RNF-12
<b>Scripts</b>	RF-02, RF-05, RF-09, RF-11	RNF-01, RNF-03, RNF-04, RNF-06, RNF-07, RNF-09, RNF-10, RNF-11, RNF-12
<b>Zabbix</b>	RF-02, RF-03, RF-4, RF-05, RF-06, RF-07, RF-08	RNF-04, RNF-05, RNF-06, RNF-07, RNF-09, RNF-11, RNF-12

Fonte: O próprio autor.

construído com base na utilização do sistema pelo usuário, que usará as informações, e do desenvolvedor, que aplicará o sistema ao DC. Os requisitos não funcionais também bem distribuídos entre os componentes.

## 3.4 Considerações Parciais

No início deste capítulo, foi definido um documento de requisitos, que visa delimitar de forma concisa, todas a funcionalidades e objetivos que a solução GreenHop deve prover. Com base nesta análise e nas soluções correlatas, foi possível estabelecer um conjunto de componentes que farão parte da solução GreenHop. Tais componentes são: ZigBee, Arduino, Banana Pi, GNU/Linux e Zabbix, sendo que os sensores estão especificados junto com a solução. Ao final é feita uma verificação se os requisitos levantados satisfazem os componentes selecionados para a solução proposta.



## 4 Solução de monitoração proposta:

### GreenHop

Este capítulo define de forma detalhada a solução proposta, denominada GreenHop. São descritos os principais objetivos da solução, como é constituída a RSSF, apresentando as características dos nodos em relação a como estão configurados e sobre os sensores que são utilizados. Por fim, é feita uma verificação dos requisitos levantados e sobre como eles são satisfeitos com a aplicação da solução GreenHop.

#### 4.1 Objetivo da solução GreenHop

A solução proposta, denominada GreenHop, tem por objetivo fornecer informações sobre o comportamento do consumo energético através das métricas de eficiência para DCs categorizados como Local, Sala ou Armário de Servidores. As métricas utilizadas na solução GreenHop permitem avaliar a relação entre o consumo dos equipamentos de TI e os demais sistemas de suporte através da análise dos valores do PUE e DCiE em tempo de operação. Paralelamente, a solução possibilita manter os servidores em operação sob rígido controle ambiental, conforme estabelecido pela norma TIA-941 adotada como padrão operacional. A eficiência energética é inicialmente obtida com a redução do consumo de energia do sistema de refrigeração, por ser um dos equipamentos de maior consumo. De forma geral, a solução GreenHop permite ao gestor avaliar o impacto sobre a adoção de diversas políticas de eficiência energética, a exemplo das estabelecidas inicialmente na Seção 2.5.

O GreenHop é desenvolvido exclusivamente por plataformas *open source*, afim de prover os benefícios já especificados na Seção 2.7.2. Essa abordagem permite ao gestor adequar a solução proposta aos requisitos singulares de seu ambiente de DC, sem se preocupar com as restrições impostas por licenças proprietárias.

A solução proposta é constituída por componentes de hardware que formam uma RSSF, para obtenção dos dados dos sensores, e componentes de soft-

ware que permitem a organização destes dados, transformando-os em informações possíveis de serem monitoradas, interpretadas e visualizadas. A partir da análise de requisitos previamente realizada na Seção 3, foram selecionados os componentes de hardware: Arduino para os nodos finais, computador Banana Pi para armazenamento dos dados e o protocolo de comunicação sem fio ZigBee, além dos sensores definidos na Seção 4.4. É utilizado o software Zabbix (servidor, agente e *front-end Web*) com banco de dados MySQL, executando sobre o sistema operacional GNU/Linux Raspbian V3.0, bem como um conjunto de *scripts* em Python, desenvolvidos para fazer a integração entre os dados recebidos pela RSSF e o Zabbix.

## 4.2 Constituição da RSSF

A RSSF do sistema de monitoramento GreenHop possui dois tipos de nodos: final e coordenador. Os nodos finais realizam o monitoramento do consumo de energia e dos parâmetros ambientais. Apenas um nodo coordenador, que possui o papel de sorvedouro (*sink*) da rede, conectado ao Banana Pi, recebe as informações enviadas pelos nodos finais e os armazena no software de monitoramento Zabbix.

A flexibilidade dos rádios ZigBee facilita a distribuição dos nodos, de forma que todo o ambiente seja monitorado. Novos nodos podem ser adicionados à rede de forma automática, bastando que esteja configurado com as credenciais de segurança da rede em operação. Os *scripts* em Python, que tratam as informações do nodo coordenador, verificam se os pacotes de dados estão dentro das especificações do utilizado pelo GreenHop, e alertam ao usuário para adicionar o novo nodo ao dicionário do Python.

A arquitetura da RSSF da solução GreenHop é plana, pois todos os nodos são semelhantes quanto à capacidade de processamento e tipo de informação enviada. A comunicação entre os nodos é proativa, *i.e.*, enviam os dados periodicamente, dentro de um tempo fixado e um *timeout* de resposta, sem que seja necessário acionar qualquer outro evento. Em ambientes de proporções maiores, os nodos finais podem atuar como roteadores dos nodos mais distantes do coordenador. Isto ocorre pois os rádios ZigBee estão pré-configurados para atuarem com a topologia em malha (*mesh*), possibilitando que os dados cheguem ao destino por múltiplos saltos, arquite-

tura denominada por (*multihop*).

O protocolo ZigBee faz a coordenação do acesso entre os nodos, para organizar o recebimento dos dados de cada nodo final, evitando a concorrência de acesso ao meio e outras possíveis interferências. Diferentes topologias para a distribuição dos nodos podem ser formadas, sendo a topologia do tipo estrela comum em ambientes menores que trinta metros quadrados, a exemplo do estudo de caso.

### 4.3 Constituição dos nodos de sensores

Cada nodo é constituído de uma placa Arduino UNO, com uma *shield* X-Bee, onde são acoplados os módulos do rádio que executam o protocolo ZigBee. Todos os sensores (descritos na Seção 4.4) estão conectados ao Arduino, que por sua vez, processa as informações sobre o parâmetro monitorado. Os nodos finais permitem o uso de até treze sensores distintos nas diversas portas digitais e analógicas do Arduino. Estes sensores possuem características e protocolos diversos e podem ser utilizados de forma simultânea, pois a programação do MCU do Arduino permite essa heterogeneidade através do uso de bibliotecas.

O uso de baterias para a alimentação dos nodos torna a solução independente da disponibilidade de energia nos pontos a serem mensurados, além do fato de esta abordagem aumentar a mobilidade dos nodos finais. Embora os protocolos de RSSF foquem em preservação de energia, a alimentação dos nodos da solução GreenHop é feita por fontes de corrente alternada chaveada (5 Volts e 1 Ampere). Esta opção foi adotada devido a presença de pontos de energia para alimentar os nodos finais e devido a indisponibilidade de baterias para essa finalidade. Usando a abordagem de alimentação direta, minimiza-se a necessidade de manutenção nas baterias dos nodos e também possibilita o aumento de frequência nas leituras, configurado para ser enviado a cada três segundos. A grande quantidade de leituras realizadas nos diversos sensores, em conjunto a transmissão destes dados gerados, consome uma quantidade de energia que inviabiliza o uso de baterias, resultando em pouco tempo de duração da bateria e logo aumentando a manutenção. Uma abordagem intermediária é utilizar as baterias como um sistema de UPS, sendo constantemente carregadas e acionadas apenas em casos de falta de energia direta local, assim a solução continu-

aria em funcionamento, mesmo com indisponibilidade de energia. Salienta-se que não é recomendável alimentar os nodos através da interfaces USB dos servidores, pois ao desligar o servidor, o nodo também será desligado. Outros fatores que devem ser considerados são o tipo de sensor usado em determinados nodos (existem sensores que demandam maior consumo) e quantidade de frequência nas leituras, pois um tempo menor afeta o consumo de energia.

O tempo de leitura entre os envios de pacotes é configurável, permitindo ajustar a resolução do monitoramento conforme a necessidade, *i.e.*, enviar um pacote a cada '*n*' segundos. Durante esse tempo de leitura, são obtidos os valores de todos os sensores em ciclos de leituras sequenciais. Utiliza-se o método de *buffer* de leitura, onde é enviado para o nodo coordenador apenas a média aritmética inerente a cada parâmetro. Enquanto não há o envio do pacote, este método permite que sejam feitas dezenas de leituras por segundo. Neste método, o MCU não é intencionalmente suspenso, a não ser para as limitações individuais de cada sensor, *e.g.*, o tempo mínimo para o sensor DHT22 ser lido com precisão é de dois segundos. Isso, determina que o tempo de leitura mínimo a ser configurado é de dois segundos e, para não estourar valor máximo dos registradores do Arduino, o tempo máximo configurável é 15 minutos. Utilizando essa abordagem do *buffer* de leitura, não há grande perturbação no resultado final quando ocorrem oscilações bruscas, possivelmente causadas por interferências.

Uma segunda abordagem inicialmente testada, é fazer a leitura uma única vez em cada sensor entre os envios dos pacotes. Entretanto foi descartada, pois para os casos de configurar um tempo de leitura maior (*e.g.*, para quinze minutos), a precisão do resultado pode ser afetada, por desconsiderar as possíveis oscilações neste meio tempo. Para o caso de os nodos serem alimentados apenas por baterias, esta torna-se uma boa opção para reduzir o consumo de energia, devido aos estabelecimento de um estado de suspensão (*sleep*) dos nodos. Porém todas estas especificações podem ser facilmente modificadas para suprir as necessidades desejadas.

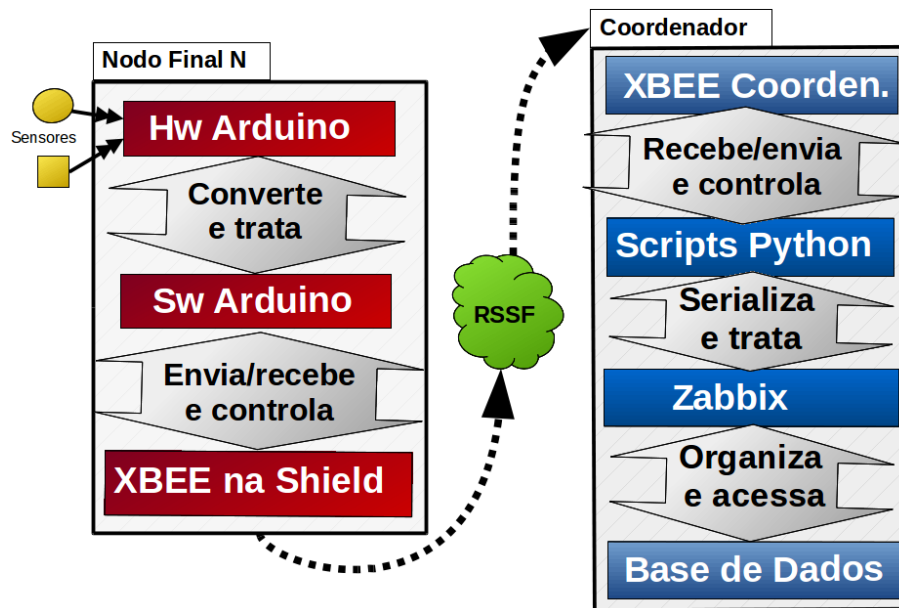
Devido ao fato de serem nodos de sensores sem fio, é vago saber qual o seu estado atual de operação, por não ter outra forma de comunicação com o usuário/operador, a não ser os dados recebidos no nodo coordenador. De forma geral, entre os possíveis estados que um nodo final do GreenHop pode estar, é interessante

ao usuário saber: se está ligado na energia, em tempo de leitura das informações, enviando uma informação, recebendo uma confirmação de que a informação foi entregue e em estado de suspensão. Outro estado que não seja um dos previamente estabelecidos, pode ser considerado como um estado de erro. Além dos LEDs presentes em cada Arduino e na Shield X-Bee, este problema é resolvido com a aplicação de LEDs no padrão *Red, Green, Blue* (RGB), sendo utilizado uma determinada cor e tempo de brilho para cada estado.

Dependendo dos requisitos de cada aplicação, outros sensores e atuadores além dos especificados no projeto, podem ser adicionados com pouca necessidade de modificação no código principal do Arduino. Basta adicionar as bibliotecas do sensor em questão e atribuir o valor do parâmetro desejado à uma das posições do vetor de dados. O *buffer* de leitura é feito automaticamente e o valor médio final do novo parâmetro é enviado através da RSSF. No nodo coordenador do Banana Pi, apenas se faz necessário adicionar o novo parâmetro no *script* em Python, denominado `greenHop.py`, que é responsável por serializar as informações da RSSF para tratar os dados e enviar para o servidor Zabbix. Em um arquivo de configuração do `greenHop.py`, deve ser adicionada a nova chave a ser utilizada pelo Zabbix, na posição do vetor correspondente ao inserido no Arduino, afim de que o Zabbix saiba que o novo valor está relacionado à determinada chave na mesma posição do vetor. É utilizado o conceito chave-valor da notação em *JavaScript Object Notation* (JSON), para enviar estas informações via SNMP Trapper ao servidor Zabbix, que é o responsável por organizar, analisar e armazenar todas as informações em sua base de dados.

Na Figura 4.1 as setas de duas pontas mostram que os dados podem trafegar nos dois sentidos, possibilitando que o nodo coordenador também envie informações para o nodo final, *e.g.*, se forem utilizados comandos para atuadores remotos. Essa possibilidade foi inicialmente testada com sucesso, apenas sendo exigido uma modificação no código do Arduino e do *script* principal. O *script* `greenHop.py` está preparado para receber novos nodos automaticamente, *i.e.*, os que não estão previamente estabelecidos no seu arquivo de configuração. Para isso, basta que o rádio ZigBee tenha o *firmware* compatível ao usado pela rede atual, possua as credenciais necessárias para a aceitação na rede (ID, CH, DH-DL e a chave de criptografia AES, quando configurada) e que os pacotes enviados sejam compatíveis com o padrão estabelecido pela solução GreenHop. O padrão consiste em um vetor de

Figura 4.1: Fluxo dos dados entre nodos finais e nodo coordenador.



Fonte: O próprio autor.

quinze posições (*floats*), sendo uma posição para as médias usada para calcular o *buffer* de leitura, uma posição para o relatório de erros da RSSF detectados à partir do nodo que envia o pacote e as demais treze posições usadas para os diversos sensores utilizados simultaneamente.

## 4.4 Características dos sensores

Quando se desenvolve um sistema de monitoramento, um dos desafios encontrados é a escolha dos sensores que o constitui, pois devem satisfazer os requisitos necessários, ao mesmo tempo em que devem atender as faixas de operação fenômeno analisado. Além dos critérios de disponibilidade de mercado e facilidade de aquisição, foram considerados os seguintes pontos para a tomada de decisão (GENOVA et al., 2009): acuidade, precisão, resolução, consumo de energia e facilidade de integração ao Arduino por bibliotecas. Estes fatores influenciam diretamente na relação custo/-benefício de um sensor, por esse motivo foram valorizados os sensores de baixo valor de aquisição mas que suprem as necessidades esperadas.

As informações dos parâmetros ambientais e de energia são obtidas com o uso de sensores específicos para cada fim. Estes sensores estão conectados ao

MCU do Arduino, o qual é responsável por processar os sinais analógicos e digitais, de acordo com o protocolo de comunicação usado por cada sensor (I2C, OneWire, SPI, dentre outros). No código desenvolvido para o MCU, já estão configuradas as bibliotecas possíveis de serem utilizadas por diferentes sensores, inclusive os que estão relacionados na Tabela 4.1. Para melhor organização do código e otimização da compilação, é utilizada uma abordagem de programação que utiliza o pré-processador para facilitar a adição/remoção de novos sensores, sem a necessidade de modificar o código principal. Isso é possibilitado através de simples alterações nas macros definidas no arquivo de cabeçalho anexo ao código principal do Arduino. A Tabela 4.1 lista todos os sensores que são utilizados no estudo de caso (Seção 5.1), selecionados por critérios como disponibilidade de mercado e facilidade de aquisição, além de cumprir com as exigências mínimas exigidas por um sistema de monitoramento para DC.. Na coluna de consumo, o valor é considerando durante o modo de operação, a acuidade é a margem de erro que o sensor pode ter (diferença entre o valor real e o medido) e a coluna das faixas determina os valores máximo e mínimo que cada sensor pode realizar as leituras. A Tabela 4.1 está organizada em três categorias:

**Ambiental:** Lista os parâmetros ambientais, tais como temperatura, umidade e pressão atmosférica. O ponto de orvalho é obtido através de cálculos com temperatura e umidade.

**Segurança:** Considera os sensores relacionados à segurança física. Esta é uma categoria que foi inicialmente testada com o sensor de fumaça, mas pode-se adicionar sensores de presença e alagamento.

**Energia:** Lista os sensores referentes ao consumo de energia elétrica. Outros sensores poderiam obter parâmetros de qualidade de energia (tensão elétrica, fator de potência, frequência, *etc*) mas não é o foco do presente trabalho.

Alguns sensores listados na Tabela 4.1 leem mais de um parâmetro, como por exemplo o DHT22 obtém simultaneamente os parâmetros de temperatura e umidade, enquanto o BMP180 obtém a temperatura e a pressão atmosférica. Ao usar estes dois sensores no mesmo nodo, é possível ter redundância na medição da temperatura em um mesmo ponto.

O sensor de fumaça foi testado durante a fase inicial do presente trabalho,

Tabela 4.1: Sensores de baixo custo testados no GreenHop.

Categoria	Parâmetros	Sensores	Consumo	Acuidade	Faixas
Ambiental	Temperatura	DHT22	1,5mA	0,5 °C	-40~80 °C
		BMP180	5 $\mu$ A	1 °C	0~65 °C
		DS18B20	1mA	0,5 °C	-55~125 °C
	Umidade	DHT22	4,3mA	2%	0~100%
	Pressão Atmosférica	BMP180	5 $\mu$ A	0,06hPa	300~1100hPa
Segurança	Fumaça (CO <sub>2</sub> )	MQ-2	150mA	Regulável	300~10k ppm
Energia	Consumo de Energia	SCT-013-000	-	3%	0~100A
		ACS 714	-	1,5%	0~30A

Fonte: O próprio autor.

porém foi descartado devido a divergência de sua aplicação com os objetivos principais do projeto. Outro sensor que foi testado e descartado ainda durante as fases iniciais do projeto é o de consumo de energia ACS 714, pois exige alguma alteração na infraestrutura de energia.

O sensor de corrente do tipo SCT013-000 é um transformador de corrente de núcleo partido para até 100 Amperes. O diferencial deste modelo é seu desenvolvimento para aplicação de modo não-invasivo, evitando que os equipamentos monitorados necessitem ser desativados para sua instalação, ou precise de um técnico para fazer alterações na fiação elétrica. Como um dos objetivos da solução GreenHop é ser de fácil aplicação, este sensor é considerado ideal, sendo este modelo o utilizado no estudo de caso descrito na Seção 5.1. Entretanto, caso desejar adotar o sensor do tipo ACS 714, deve-se considerar que sua instalação é mais complexa e possui corrente limitada a 30 Amperes. Para possibilitar a obtenção do valor do PUE, é indispensável a medição em pelo menos dois pontos principais de distribuição de energia: nos sistemas de suporte e nos sistemas computacionais.

Salienta-se que é possível incluir outros sensores não listados nesta tabela, desde que compatíveis com o Arduino e observando a disponibilidade de portas digitais e analógicas do modelo de Arduino usado. Neste caso, deve-se apenas modificar as bibliotecas do Arduino, para as bibliotecas compatíveis com o novo sensor. Os requisitos mínimos também podem variar de acordo com o ambiente em que será aplicado a solução GreenHop, devendo este ser um critério especial para a seleção



dos sensores que comporão a solução. No estudo de caso, são realizados testes para estes sensores relacionados na Tabela 4.1 para verificar a satisfatoriedade na obtenção dos parâmetros ambientais e de consumo energético.

## 4.5 Requisitos vs. Solução proposta

Após a análise dos resultados previamente obtidos com a solução GreenHop, é possível fazer uma verificação se a solução proposta satisfaz os requisitos levantados no Capítulo 3. Esta retomada é interessante para aferir se o desenvolvimento do projeto está em concordância com o que foi inicialmente estabelecido no Documento de Requisitos (Seção 3.1). As Tabelas 4.2 e 4.3 estabelecem uma relação entre cada requisito com o modo em que é satisfeito.

Esta relação (Tabelas 4.2 e 4.3) mostra que todos requisitos foram satisfeitos. Deve-se considerar que, mesmo com a finalização do presente trabalho, a solução GreenHop ainda continuará em fase de desenvolvimento, e dessa forma novos requisitos serão desenvolvidos.

## 4.6 Considerações Parciais

O presente capítulo descreveu a proposta da solução de monitoramento ambiental e energético para a sala de servidores de um DC. Foram mostrados os objetivos que é obter a eficiência energética e manter os parâmetros ambientais dentro das faixas de valores estabelecidos pelas normas técnicas. Foi exemplificado como a RSSF é constituída, com detalhes sobre a rede sem fio, como funcionam os nodos e os sensores. Por fim, foi feita uma relação entre o Documento de Requisitos e a solução proposta, sendo que a maior parte dos requisitos foram satisfeitos e uma tabela com todos os resultados consolidados.

Tabela 4.2: Relação da satisfação dos requisitos funcionais.

Requisitos	Como é atendido na solução
Requisitos Funcionais	
<b>RF-01</b>	Os sensores utilizados mostraram-se compatíveis com o ambiente de DC, obtendo os dados de forma precisa e dentro das faixas de valores estabelecidas.
<b>RF-02</b>	As informações são gravadas no banco de dados do Zabbix, e podem ser acessadas tanto pela Zabbix quanto diretamente pelo console do MySQL.
<b>RF-03</b>	Os gráficos do Zabbix são personalizáveis por parâmetro e período. Um exemplo é as figuras mostradas na Seção 6.1.
<b>RF-04</b>	É possível representar todas as informações através de gráficos pelo Zabbix, inclusive o valor das métricas.
<b>RF-05</b>	Na base dos todos os gráficos são mostrados resumos do período selecionado, como os valores de mínimo e máximo, a média do período e o ultimo valor do gráfico.
<b>RF-06</b>	Os tipos de gráficos são configurados em sua criação, podendo ser gráficos de proporções (para dados em percentual), gráficos de linhas (dados com continuidade) ou ainda gráficos de barras (poucos dados discretos). Retirar e adicionar dados só é possível pelo console do MySQL.
<b>RF-07</b>	Este requisito é satisfeito pelo Zabbix, que já fornece a possibilidade de criar alertas ou "triggers".
<b>RF-08</b>	Em testes realizados, o Zabbix mostrou-se capaz de executar alertas remotos por e-mail e alertar localmente com aviso sonoro quando um nodo detecta que ultrapassou a temperatura configurada.
<b>RF-09</b>	Requisito satisfeito por usar o protocolo ZigBee e pelo desenvolvimento dos Script em Python para a solução GreenHop.
<b>RF-10</b>	O método de programação usado nos Arduinos permite que sejam adicionados, modificados e removidos os sensores dos nodos.
<b>RF-11</b>	O tempo entre leituras configurado por padrão é de três segundos, mas pode variar de dois segundos até quinze minutos.
<b>RF-12</b>	Todos os nodos possuem um LED RGB que mostram o estado atual do nodo, da conexão com a rede, além dos LEDs já existentes no Arduino e na <i>Shield X-Bee</i> .
<b>RF-12</b>	Desenvolver os nodos com Arduinos, X-Bee e Banana Pi possibilitou que os nodos finais e coordenador tenham um tamanho reduzido. Salienta-se que é possível reduzi-los ainda mais se selecionados/desenvolvidos outros componentes.
<b>RF-13</b>	Adotar como protocolo de comunicação o ZigBee com os rádios X-Bee, permitiu a comunicação sem fios e com baixo consumo de energia.
<b>RF-14</b>	Todos os componentes de hardware selecionados para a solução GreenHop são de baixo consumo de energia.

Fonte: O próprio autor.

Tabela 4.3: Relação da satisfação dos requisitos não-funcionais.

Requisitos	Como é atendido na solução
<b>Requisitos Não Funcionais</b>	
<b>RNF-01</b>	No Banana Pi, o <i>script</i> que recebe os dados foi implementado de modo a reconhecer novos nodos automaticamente, bem como pelo protocolo ZigBee.
<b>RNF-02</b>	Este critério é implementado pelo protocolo ZigBee e foi testado com sucesso.
<b>RNF-03</b>	Os Arduinos foram programados de forma que, ao entrar em um ciclo inesperado, um contador específico é incrementado e ao chegar à um limite estipulado, o nodo é reiniciado.
<b>RNF-04</b>	A interface do Zabbix torna fácil de ser utilizada, pois existem diversas documentações que auxiliam o usuário de como proceder para consultar as informações recebida e criar novas <i>triggers</i> .
<b>RNF-05</b>	O Zabbix é um servidor que possui uma interface web robusta que permite ser acessada por qualquer dispositivo, desde que tenha um navegador de internet.
<b>RNF-06</b>	Todos os componentes são modularizados, <i>i.e.</i> , encaixáveis, desde os sensores, o X-Bee e o Arduino, até os periféricos do Banana Pi, como disco rígido e receptor do X-Bee.
<b>RNF-07</b>	Todos os componentes utilizados são componentes de software e hardware livre.
<b>RNF-08</b>	A adoção dos rádios X-Bee que utilizam o protocolo ZigBee permite que este requisito seja satisfeito.
<b>RNF-09</b>	Salienta-se que todo o sistema está em execução a mais de 365 dias e se mantém em operação contínua e com total integridade dos dados até o presente momento.
<b>RNF-10</b>	Foi adotada a norma TIA-942 como referência de temperatura, umidade e ponto de orvalho, bem como as métricas PUE e DCiE, para informações sobre eficiência energética.
<b>RNF-11</b>	Todos os componentes foram selecionados visando um baixo custo de aquisição
<b>RNF-12</b>	O fato de terem sido selecionados componentes <i>open source</i> , permite que pelo menos os projetos destes componentes seja de domínio público. Até o momento, os componentes empregados no desenvolvimento do GreenHop ainda encontravam-se disponíveis no mercado

Fonte: O próprio autor.

## 5 Estudo de caso & Plano de testes

O presente capítulo visa descrever o ambiente de estudos de caso, com o objetivo de clarificar as características do local onde são realizados os testes. Aplicar a solução em um ambiente real, exige um plano de testes bem definido, permitindo comparar de forma fidedigna as características ambientais antes e depois da aplicação da solução GreenHop, e verificar qual o impacto de sua utilização em um DC. Portanto é apresentado um plano de testes, permitindo organizar melhor o modo como são apresentados os resultados. Por fim, os testes são consolidados de modo a organizar melhor as informações.

### 5.1 Estudo de caso

Foi utilizado como ambiente de estudo de caso o Laboratório de Processamento Paralelo e Distribuído (LabP2D) da UDESC para o levantamento de requisitos e realização dos testes, descritos na Seção 5.2. O LabP2D oferece recursos humanos e físicos para realização de atividades de pesquisa, ensino e extensão à comunidade acadêmica da UDESC. Segundo as definições estabelecidas na Seção 2.2, o LabP2D é um DC de *tier* 1, de tamanho pequeno, baixa densidade e de porte local, mas sem redundância de energia.

Em uma área total de trinta metros quadrados, o LabP2D abriga um sistema computacional constituído de trinta computadores desktops com potência máxima de 10,5 kW, um *rack* contendo quatro servidores de *rack* com potência máxima de 4 kW e quatro *switches* gerenciáveis com potencia máxima total de 800 W. Uma das principais aplicações do LabP2D é prover uma nuvem computacional privada com a solução OpenStack, na qual todos os equipamentos de TI estão integrados entre si, inclusive os desktops são usados como servidores de processamento da nuvem. Os computadores desktop estão organizados em corredores quente e frio, mas com recirculação do ar quente. O ambiente do LabP2D foi escolhido por exemplificar a situação de empresas de pequeno a médio porte, que usualmente começam empregando desktops

como servidores e depois expandem a sua capacidade, adicionando servidores de *rack*.

Entre os sistemas de suporte, destaca-se o equipamento de ar condicionado *split* de 30kBTUS (equivalente a 2,5 Toneladas de Refrigeração (TR)), que distribui o ar frio pelo método *overhead*, e tem potência máxima de 2,6 kW. Apenas para uso operacional, uma bancada com cinco estações de trabalho (desktops e monitores LCD), com potência máxima de 2,7 kW. O sistema de iluminação utiliza lâmpadas fluorescentes, que totaliza 480 Watts de potência.

Mesmo caracterizado como um laboratório de pesquisa, todos os sistemas computacionais e de suporte são mantidos em funcionamento contínuo, exceto a iluminação que é ligada apenas enquanto a sala está ocupada. Salienta-se que durante toda a fase de testes, o laboratório manteve-se com estas configurações. A Figura 5.1 mostra o interior da sala de servidores do LabP2D.

Figura 5.1: Ambiente usado como estudo de caso: LabP2D.



Fonte: O próprio autor.

Salienta-se que o tipo de calor que é gerado no LabP2D é do tipo sensível, *i.e.*, proveniente apenas de equipamentos eletrônicos e, portanto, dispensa qualquer teste sobre o calor latente gerado por humanos. Antes da implantação da solução GreenHop, os responsáveis pelo laboratório desconheciam o funcionamento da dinâmica dos parâmetros ambientais com exatidão. Na tentativa de suprir uma demanda desconhecida de calor, este ambiente era mantido à uma temperatura constante de 18°C, para garantir que os equipamentos não fossem danificados pelo excesso de calor gerado pelos processadores. Esta também é uma realidade comum para empresas de

pequeno a médio porte que desconhecem as boas práticas estabelecidas por normas, como a TIA-942. Como uma das características da solução GreenHop é ser independente da infraestrutura existente (computacional e rede), não foi necessário modificar nenhum equipamento ou utilizar a rede local para a realização dos testes. Portanto, é apenas utilizada a energia elétrica para alimentação dos dispositivos físicos do GreenHop (nodos e Banana Pi). Salienta-se que anteriormente à este trabalho não havia-se testada a aplicação da técnica do *free cooling* no LabP2D, bem como era desconhecido aos gestores do laboratório as potencialidades da região de Joinville–SC/Brasil para este tipo de técnica.

## 5.2 Plano de testes

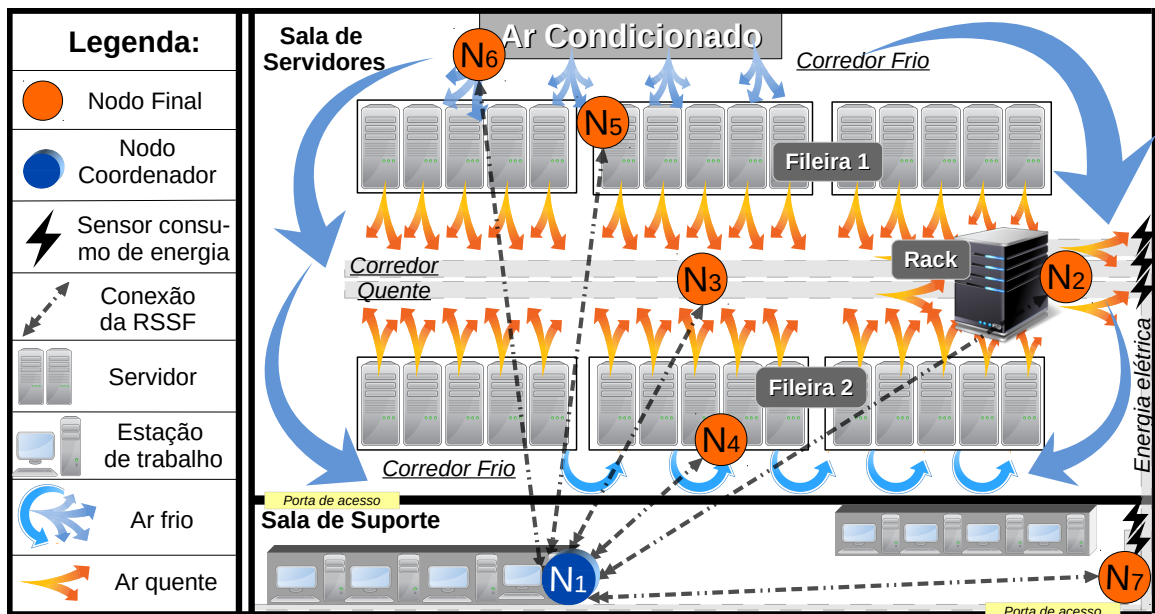
O plano de testes é elaborado de forma a possibilitar uma comparação fidedigna dos parâmetros desejados antes e depois da aplicação da solução GreenHop. As especificações da norma TIA-942-A são utilizadas como referência, onde as características ambientais da laboratório devem ser mantidas entre as faixas de valores mínimo e máximo, conforme definidas na Tabela E.1. Durante o período de testes, os equipamentos de TI estão com uma carga de processamento entre 30% e 70%, alterando-se conforme a demanda naturalmente exigida por meio das aplicações. Apenas foi modificada a temperatura do equipamento de refrigeração conforme o plano de testes, ou desativado o equipamento no caso do *free cooling*.

### 5.2.1 Organização dos nodos

Após identificar os pontos estratégicos para a distribuição dos nodos, estão organizados conforme especificado na Figura 5.2. O nodo coordenador ( $N_1$ ) está localizado na mesa da equipe de suporte e conectado ao Banana Pi, alimentado por uma fonte de 5 Volts e 3 Amperes, devido ao consumo do Banana Pi e disco rígido. Dentre os nodos finais, destacam-se os nodos  $N_2$  e  $N_7$ , que além de monitorar os parâmetros ambientais ainda monitoram o consumo de energia. De forma mais precisa, o nodo  $N_2$  mensura o consumo de energia dos sistemas computacionais através de três sensores, sendo um sensor posicionado no *Power Distribution Units* (PDUs) de cada uma das duas fileiras dos computadores *desktop* e um sensor no *rack*. O nodo  $N_7$  está po-

sicionado no quadro de energia, e mensura o consumo dos sistemas de suporte com dois sensores, sendo um sensor para a iluminação e bancada operacional e outro sensor apenas para o ar condicionado. Portanto, o consumo de energia é feito através de cinco sensores de corrente elétrica do tipo não-invasivo (SCT013-000), alocados em apenas dois nodos finais, sendo que o  $N_2$  mensura o consumo dos sistemas computacionais e o  $N_7$  mensura o consumo dos sistemas de suporte.

Figura 5.2: Distribuição dos nodos no LabP2D.



Fonte: O próprio autor.

Os demais nodos, *i.e.*,  $N_3$ ,  $N_4$ ,  $N_5$  e  $N_6$ , monitoram apenas os parâmetros ambientais. Estão organizado de forma distribuída entre corredores quente e frio. O nodo  $N_2$  está posicionado na saída de ar quente do rack, o  $N_3$  no meio do corredor quente formado pelos computadores desktops, dois nodos,  $N_4$  e  $N_5$ , posicionados nos corredores frios, o  $N_6$  na saída do ar condicionado e por fim, o  $N_7$  posicionado no quadro de energia, externo à sala de servidores, mas ainda dentro do laboratório. O ideal é ter uma maior quantidade de pontos de coleta, pois quanto maior for a granularidade das informações, maior será o detalhamento dos resultados. Todos os nodos finais, com exceção do  $N_6$  posicionado na saída de ar do equipamento de refrigeração, estão a uma altura de 1,5 metros do piso. Todos os nodos são alimentados por uma fonte com saída de 5 Volts e 1 Ampere. A Tabela 5.1 relaciona os nodos utilizados no estudo de caso com os seus respectivos tipos, localização, parâmetros analisados, bem como os sensores utilizados em cada local.

Tabela 5.1: Relação de nodos utilizados no estudo de caso.

Nodo	Tipo	Localização	Parâmetros	Sensores
N <sub>1</sub>	Coordenador	Mesa de suporte	Recebe dados da RSSF	Nenhum
N <sub>2</sub>	Final	<i>Rack</i>	Temperatura, umidade, pressão e energia	DHT22, BMP180 e SCT013
N <sub>3</sub>	Final	Corredor quente	Temperatura, umidade, pressão	DHT22 e BMP180
N <sub>4</sub>	Final	Corredor frio	Temperatura, umidade, pressão	DHT22 e BMP180
N <sub>5</sub>	Final	Corredor frio	Temperatura, umidade, pressão	DHT22 e BMP180
N <sub>6</sub>	Final	Ar condicionado	Temperatura, umidade, pressão	DHT22 e BMP180
N <sub>7</sub>	Final	Quadro de energia	Temperatura, umidade, pressão e energia	DHT22, BMP180 e SCT013

Fonte: O próprio autor.

Os dados coletados enviados são armazenados na base de dados do Zabbix, que permite a visualização por gráficos gerados em tempo de leitura através da sua interface *Web*. Durante todos os testes, o tempo de leitura configurado é de três segundos.

A pressão atmosférica é um parâmetro que foi adicionado à solução GreenHop, mas não é estabelecido pela norma TIA-942-A. É um sensor utilizado para verificar a quantidade de ar que está sendo movimentada dentro da sala. Em ambientes de DC que utilizam ar condicionado de precisão, pode ser verificada a perda de pressão em pontos estratégicos ou nos dutos de ventilação (se for o caso), permitindo que ações possam ser tomadas para aumentar a eficácia da refrigeração (ARGHODE et al., 2015; SATO et al., 2015). Um exemplo de análise é observar o quanto um grupo de cabos do equipamento pode estar atrapalhando o fluxo do ar, sendo portanto necessário uma melhor organização. Em ambientes que não contam com equipamentos de precisão com insuflamento por dutos, como é o caso do LabP2D, este parâmetro é utilizado para verificar os momentos em que a porta da sala de servidores está aberta. Nestes momentos, o calor e umidade externos entram na sala e podem alterar os parâmetros ambientais, e, por consequência, alterar o valor final do PUE. Com isto, existe também a possibilidade de obter alguma eficiência energética através da alteração da velocidade da ventilação do ar condicionado.

Como resultados da aplicação dos testes, deseja-se avaliar a efetividade da adoção de uma política de eficiência energética, a exemplo das duas políticas citadas na Seção 2.5. Ao mesmo tempo em que se objetiva a redução do consumo, os parâmetros estabelecidos pela norma selecionada não foram ignorados. No caso da



TIA-942-A, manter a temperatura do ar na entrada dos servidores, conforme limites inicialmente estabelecidos. Conhecer o comportamento do equipamento de ar condicionado, durante os ciclos de refrigeração, permite analisar os picos de potência consumida das unidades condensadora e evaporadora. Para estabelecer qual o impacto do consumo de energia do equipamento em diferentes configurações de potência de refrigeração, foram estabelecidos testes em três temperaturas: 18°C, 23°C e 25°C. Para a aplicação da técnica do *free cooling*, foi utilizado o PUE e o DCiE como referência de comparação entre os testes.

### 5.2.2 Teste 1: Temperatura a 18°C

Os testes se iniciaram com a análise mantendo as condições ambientais em que o laboratório era operado, *i.e.*, com a temperatura constante em 18°C. É utilizada a temperatura de 18°C como valor de base para o incremento desse parâmetro dos demais testes. A análise dos parâmetros ambientais é feita durante um período contínuo de sete dias, mensurados sem interrupção. Durante esse teste, a temperatura externa registrada para o período é de 22°C. Foram coletados quase um milhão de parâmetros em cada teste, variando entre dados ambientais e energéticos.

### 5.2.3 Teste 2: Temperatura a 23°C

Após o teste realizado a 18°C, foi acrescida em 5°C, *i.e.*, de 18°C para 23°C, a temperatura de operação do sistema de refrigeração, mantendo-se a análise dos parâmetros ambientais durante o período de sete dias. A temperatura de 23°C foi eleita, inicialmente para respeitar as limitações de precisão dos sensores DHT22 e BMP180 e por ser um valor intermediário da faixa estabelecida pela norma TIA-942-A. A temperatura externa média registrada durante esse teste é de 24°C.

### 5.2.4 Teste 3: Temperatura a 25°C

No terceiro teste, foi acrescida a temperatura de operação do sistema de refrigeração em 7°C, *i.e.*, de 18°C para 25°C, mantendo-se a análise dos mesmos parâmetros iniciais durante o período de sete dias. Essa configuração de temperatura foi configurada,

pois é o limite superior especificado na norma TIA-942-A, portanto, sendo descartada a limitação da precisão dos sensores de temperatura, conforme estabelecido no Teste 2. A temperatura média no lado externo da sala, registrada durante o período desse teste, é de 25°C, portanto igual a temperatura configurada no equipamento.

### 5.2.5 Teste 4: Free Cooling

Por fim, foi aplicada a técnica do *free cooling*, sendo totalmente desativado o equipamento do ar condicionado e aberta as janelas da sala de servidores. O teste foi feito durante sete dias, no final do mês de maio, sendo a temperatura média externa à sala registrada no período do teste de 17°C. Segundo o histórico climatológico dos últimos trinta anos para a região de Joinville–SC/Brasil<sup>1</sup>, a temperatura varia entre 14°C e 20°C no mês de maio. Este histórico também mostra a viabilidade da aplicação da técnica do *free cooling* para cinco meses do ano (maio a setembro), distribuídos entre os períodos do outono e inverno, onde a variação térmica nesses meses é de 12°C a 20°C.

Segundo os mesmos dados históricos, a precipitação na região para esse período é consideravelmente reduzida, o que impacta na umidade relativa do ar, fator crítico a ser levado em consideração. Todavia, estima-se que o orvalho noturno possa aumentar a umidade relativa nos horários que sucedem as 18 horas. Para a aplicação deste método, salienta-se que não houve o tratamento da entrada de partículas como poeira, sendo necessário um duto que permita usar filtros específicos.

### 5.2.6 Consolidação do plano de testes

Com o objetivo de organizar e sintetizar o plano de testes, a Tabela 5.2 consolida as principais características dos quatro testes realizados. As características relacionadas são: a configuração da temperatura de funcionamento ar condicionado deve estar configurado, o incremento na temperatura base de 18°C para a nova temperatura interna e a temperatura média externa do local dos testes. A duração de todos os testes são de sete dias e os mesmo sensores foram utilizados em todos os quatro testes realizados.

---

<sup>1</sup>Climatepo - <http://www.climatepo.com.br/climatologia/381/joinville-sc>

Tabela 5.2: Síntese do plano de testes realizado no LabP2D.

Plano de Testes	Teste 1	Teste 2	Teste 3	Teste 4
Temperatura interna	18 °C	23 °C	25 °C	<i>Free Cooling</i>
Incremento na temperatura	Base	5 °C	7 °C	–
Temperatura externa	22 °C	24 °C	25 °C	17 °C

Fonte: O próprio autor.

Durante todos os testes é utilizado a mesma organização dos nodos e feita a verificação do consumo de energia nos sistemas computacionais e de suporte. Utilizar um plano bem definido e executado sob rigor, possibilita obter os resultados corretos de forma que todos os testes possam ser igualmente equiparados.

## 5.3 Considerações Parciais

O presente Capítulo descreveu o ambiente de estudos de caso, como o local onde são realizados os testes. É eleito o LabP2D como o ambiente de estudo de caso, por ter características intrínsecas à organizações de pequeno porte. Para este ambiente foi desenvolvido um plano de testes, permitindo comparar os resultados antes e depois de aplicar a solução GreenHop. Constituído de quatro testes com a temperatura de operação do sistema de refrigeração em 18 °C, 23 °C, 25 °C e a técnica do *free cooling*, sendo por fim, consolidado estes testes em uma tabela final.

## 6 Resultados obtidos & Análise dos resultados

Com a aplicação do plano de testes descrito na Seção 5.2, foram obtidos mais de quatro milhões de dados. Para possibilitar uma análise concisa dos dados obtidos e visando uma melhor compreensão destas informações, o conteúdo foi organizado da forma como segue. Primeiramente, todos os dados obtidos são descritos na Seção 6.1, divididos entre os referentes ao monitoramento ambiental (Seção 6.1.1) e, em seguida, os referentes ao monitoramento do PUE (Seção 6.1.2), sendo relatado os quatro testes realizados em cada Seção. Em seguida, na Seção 6.2, é feita a análise destas informações, apresentando-as de forma consolidada em duas tabelas, também divididas entre monitoramento ambiental (Seção 6.2.1) e monitoramento do PUE (Seção 6.2.2).

### 6.1 Resultados obtidos

Todos os resultados foram adquiridos com a análise dos gráficos fornecidos pelo *front-end* do Zabbix. Estes gráficos mostram em sua legenda os valores de mínimo, máximo, médio e o último valor lido, para cada parâmetro analisado, compreendido no período de tempo selecionado. Para melhor visualização e leitura dos dados, é mostrado apenas uma parte do gráfico do Zabbix (*zoom in*), com o objetivo de auxiliar na compreensão dos detalhes do comportamento da métrica PUE e dos parâmetros ambientais. Tendo em vista que o comportamento do equipamento de ar condicionado é cíclico, durante a maior parte do tempo o mesmo comportamento se repete.

Os gráficos selecionados para apresentar os resultados médios, foram coletadas de modo a serem compatíveis com o comportamento padrão observado no período de sete dias em que cada teste foi feito. Em todos os gráficos estão indicados o símbolo  $\leftrightarrow$  acrescido do marcador  $\Delta T$ , que mostra o valor médio de tempo entre os acionamentos do compressor, sendo possível analisar qual a proporção em

que o compressor fica ligado e desligado nos períodos amostrados. Para melhor compreensão, os resultados obtidos estão separados, primeiramente mostrando os parâmetros ambientais e posteriormente os parâmetros das métricas PUE e DCiE.

As oscilações de consumo de energia detectadas durante os experimentos, estão associadas aos momentos no quais o compressor do equipamento de refrigeração é ligado para manter a temperatura da sala e depois por um período de tempo desligado, até a variação da temperatura exigir novamente o seu acionamento. Esse comportamento leva ao gráfico possuir oscilações similares a ondas quadradas, que só foram possíveis detectar devido ao monitoramento contínuo com intervalos de tempo de três segundos e que seriam mascarados em uma média diária ou em medições com intervalos de tempos maiores.

A energia reativa é um efeito comum que ocorre ao fornecer o campo magnético que faz os motores saírem da inércia. Durante os Testes 1, 2 e 3, os picos de consumo no instante inicial em que o compressor é ligado ultrapassam de 5 kW, que impacta instantaneamente no PUE, resultando em picos de 6 pontos da métrica. Os picos de potência no instantes da compressão do gás refrigerante, indica um grande esforço para tirar o motor da inércia, podendo-se deduzir que quanto mais vezes for acionado o compressor, maior será a sua influência no consumo médio. Os equipamentos de refrigeração tipo *split* que utilizam a tecnologia *inverter*, utilizam-se do conceito de rotação variável, permitindo eliminar estes picos de consumo. Esse comportamento mostra que quanto mais vezes é acionado o compressor, maior será a sua influência no consumo médio de energia elétrica.

### 6.1.1 Resultados do monitoramento dos parâmetros ambientais

O gráfico mostrado em cada teste relaciona a temperatura, no eixo esquerdo, com o consumo de energia do equipamento de refrigeração, no eixo direito, mas ambos no mesmo instante de tempo. Isso possibilita associar o comportamento de consumo com a variação térmica. O monitoramento dos parâmetros de umidade relativa e ponto de orvalho possuem gráficos similares ao apresentado na Figuras dos Testes de 1, 2, 3 e 4 desta Seção, sendo também disponibilizados via interface do Zabbix.

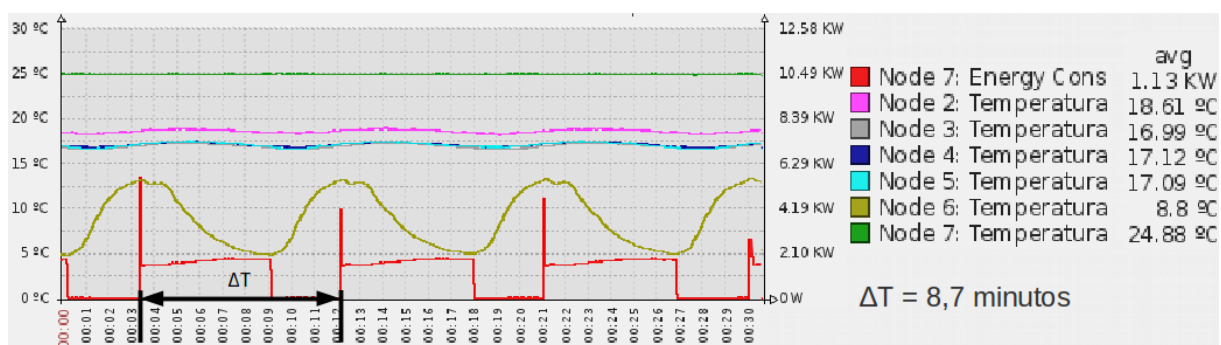
Especificamente em relação ao consumo de energia, observa-se que a

potência real de consumo durante os Testes 1, 2 e 3, os quais é modificada a temperatura do ar condicionado, é aproximadamente a mesma, variando entre 1,6kW e 1,8kW. O que influencia no valor médio do consumo de energia, é a quantidade de vezes e por quanto tempo o compressor do equipamento se mantém ligado em determinado período.

### Teste 1: Temperatura a 18 °C

Durante o intervalo de sete dias de monitoramento da temperatura à 18 °C, constatou-se uma média de consumo de energia do equipamento de refrigeração de 1,13kWh por hora, equivalente ao consumo diário de 27,1kWh. De acordo com a Figura 6.1, no marcador  $\Delta T$ , o tempo médio entre os acionamentos do compressor do gás refrigerante é de 8,7 minutos, distribuídos em 5,7 minutos ligado (64,5%) e 3 minutos desligado (35,5%). Este comportamento mostra uma frequência alta de acionamentos do compressor, quando comparado com demais testes, influenciando diretamente no valor médio obtido. A Figura 6.1 mostra o gráfico de comportamento das temperaturas e do consumo de energia, apresentando o valor médio para o período selecionado de 30 minutos.

Figura 6.1: Gráfico das temperaturas e consumo de energia a 18 °C.



Fonte: O próprio autor.

A variação média da TBS por hora é de 1,5°C/h, mostrando-se dentro do especificado pela norma. Em contrapartida, a variação da temperatura do ar que sai do equipamento de refrigeração (mensurado pelo Nodo 6) varia 10°C/h em média, inferindo-se que o esforço exigido para manter a temperatura em 18°C causa uma maior oscilação em curtos períodos de tempo, quando comparado com os demais testes. A diferença de temperatura entre os corredores quente e frio é de 2°C, mostrando-

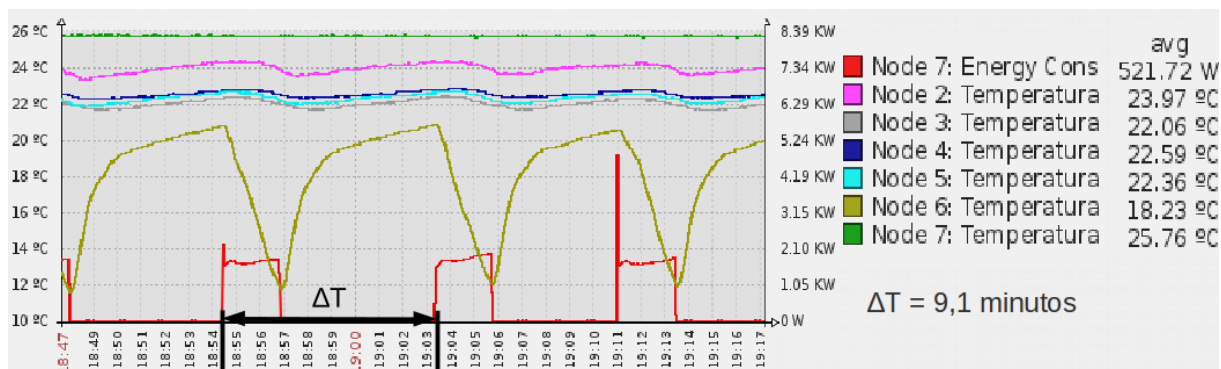
se dentro do esperado, devido a mistura do ar quente com o ar frio. O ponto de orvalho mensurado no período mostra-se dentro da faixa estabelecida pela norma, com um valor médio de 7°C, variando entre 3,5°C a 8,9°C. Por sua vez, a umidade relativa foi de 47%, em média, mostrando-se dentro dos limites estabelecidos. Todavia, os valores mínimos e máximos no período ultrapassaram os limites da faixa estabelecida, oscilando entre 37% e 58%, respectivamente. No caso da umidade relativa, percebe-se que manter a temperatura em 18°C em alguns momentos deixa o ambiente fora dos limites especificados pela norma TIA-942-A, que estabelece os percentuais de umidade relativa entre 40% e 55%.

### **Teste 2: Temperatura a 23°C**

Durante o intervalo de monitoramento com a temperatura em 23°C, constatou-se uma média de consumo de energia de 521Wh por hora, o que corresponde a um valor médio diário de 12,5kWh. Em relação ao Teste 1, ao adotar a temperatura de 23°C para a operação da sala de servidores, obteve-se uma eficiência energética de 53,9%, sem que houvesse qualquer outra alteração no equipamento. De acordo com a Figura 6.2, no marcador  $\Delta T$ , o tempo médio entre os acionamentos do compressor é de 9,1 minutos, mostrando um tempo próximo ao Teste 1. Todavia, a diferença está na distribuição do tempo em que fica ligado, permanecendo 2,6 minutos (28,6%) e desligado durante 6,5 minutos (71,4%). Este comportamento mostra uma menor frequência de acionamentos do compressor, quando comparado com o Teste 1, influenciando diretamente no valor médio obtido. A Figura 6.2 mostra o gráfico de comportamento das temperaturas e do consumo de energia, apresentando o valor médio para o período selecionado de 30 minutos.

A variação da TBS por hora, é de 2°C/h em média, constatando que o esforço exigido para manter a temperatura em 23°C é menor quando comparado com o Teste 1. A variação de temperatura entre corredor quente e corredor frio, é de 1,8°C, mostrando-se dentro do esperado. O ponto de orvalho medido no período é de 16°C, em média, mostrando-se dentro da faixa permitida, com picos de variação entre 12°C e 17°C. A umidade relativa medida na sala durante o período teve um valor médio de 52%, com o equipamento de refrigeração configurado para manter a temperatura em 23°C, com uma variação entre 48% e 54%. No caso da umidade

Figura 6.2: Gráfico das temperaturas e consumo de energia a 23°C.



Fonte: O próprio autor.

relativa, percebe-se que com a temperatura em 23°C o ambiente ficou dentro dos limites especificados pela norma TIA-942-A, bem como a sua própria variação.

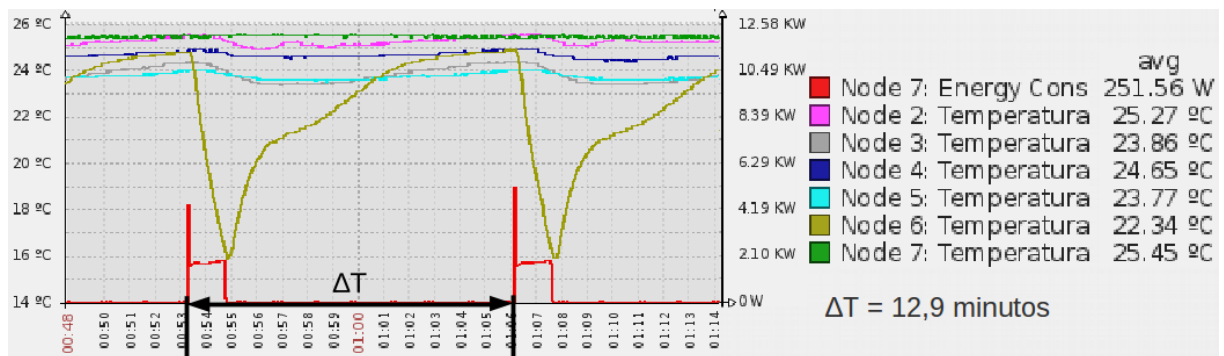
### Teste 3: Temperatura a 25°C

Durante o intervalo de monitoramento da temperatura em 25°C, constatou-se uma média de consumo de energia de 235Wh por hora, que resulta em um total diário de 5,64 kWh. A abordagem do Teste 3 corresponde a uma redução de 79,2% do consumo do sistema de refrigeração, quando comparado com o Teste 1 (temperatura em 18°C) e de 54,9% quando comparado com o Teste 2 (temperatura em 23°C). De acordo com a Figura 6.3, no marcador  $\Delta T$ , o tempo médio entre os acionamentos do compressor é de 12,9 minutos, mostrando um tempo maior que os Testes 1 e 2. Neste caso, assim como no Teste 2, a diferença está na distribuição do tempo em que fica ligado, permanecendo nesse estado por 1,5 minutos (11,6%) e desligado durante 11,4 minutos (88,4%). Este comportamento mostra uma frequência decrescente de acionamentos do compressor, quando comparado com os Testes 1 e 2, influenciando diretamente no valor médio obtido. A Figura 6.3 mostra o gráfico de comportamento das temperaturas e do consumo de energia, apresentando o valor médio para o período selecionado de 26 minutos.

A variação da TBS por hora, é de 1,2°C/h em média, constatando-se que o esforço exigido para manter a temperatura em 25°C é ainda menor quando comparado com a temperatura em 18 e 23°C. A variação de temperatura entre corredor quente e corredor frio, é de 2°C, mostrando-se equivalente aos demais testes. O valor



Figura 6.3: Gráfico das temperaturas e consumo de energia a 25°C.



Fonte: O próprio autor.

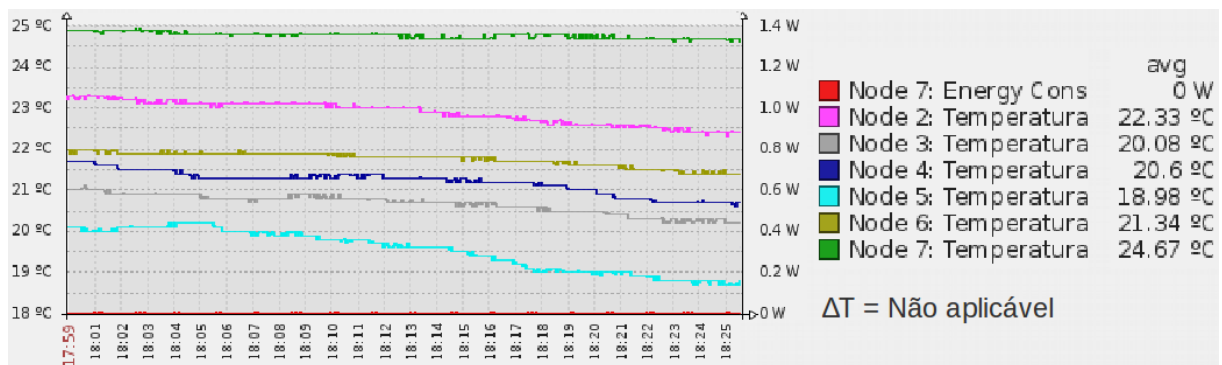
médio para o ponto de orvalho medido no período é de 17°C , mostrando-se dentro da faixa estabelecida, com uma variação entre 14°C e 18°C.

A média da umidade relativa medida na sala para este teste é de 60%. A variação mínima e máxima mensurada no período é de 50% e 69%, respectivamente. No caso da umidade relativa, percebe-se que com a temperatura em 25°C o ambiente ficou acima dos limites especificados pela norma TIA-942-A. Neste caso, uma umidade alta possibilita a corrosão dos circuitos e possibilita falhas nos contatos.

#### Teste 4: Free cooling

Na quarta e última etapa de testes, a aplicação da técnica do *free cooling* é conduzida pela eliminação total do consumo do ar condicionado (*i.e.*, 0Wh de consumo). Nesse período a temperatura da sala ficou abaixo dos limites estabelecidos pela norma TIA-942-A, apresentando uma média em torno de 18°C entre todas as medições. Porém, neste caso não há problema, pois esta temperatura é concedida naturalmente. A variação da temperatura verificada é de 3°C entre os corredores frios e quentes, em uma faixa de 17°C a 20°C. A variação máxima da TBS é de 2°C/hora, sendo influenciada conforme o fluxo de ar proveniente da parte externa da sala e conforme o anoitecer. A medição do ponto de orvalho varia entre 2°C e 11°C, apresentando um valor médio de 8°C no período de teste. A Figura 6.4 mostra o gráfico de comportamento das temperaturas e do consumo de energia, apresentando o valor médio para o período selecionado de 26 minutos, durante o teste de *free cooling*.

Em relação à umidade, verifica-se uma média de 47,5%, mostrando inicial-

Figura 6.4: Gráfico do comportamento das temperaturas durante o *free cooling*.

Fonte: O próprio autor.

mente um resultado dentro dos limites desejados. Porém, analisando o comportamento da umidade de forma detalhada, foram constatados dois pontos críticos. Durante o período diurno (das 7 horas da manhã às 18 horas da noite) a umidade média encontrada é de 35%, mostrando-se abaixo do limite estabelecido em 40%. Já durante período noturno (das 18 horas da noite às 7 horas da manhã) a umidade média é de 60%, mostrando-se acima do limite especificado em 55%. Isso mostra que o método do *free cooling* do modo como foi aplicado, embora garanta uma ótima temperatura, não mostra-se satisfazer os limites do parâmetro de umidade estabelecido pela norma TIA-942-A.

### 6.1.2 Resultados do monitoramento da métrica PUE

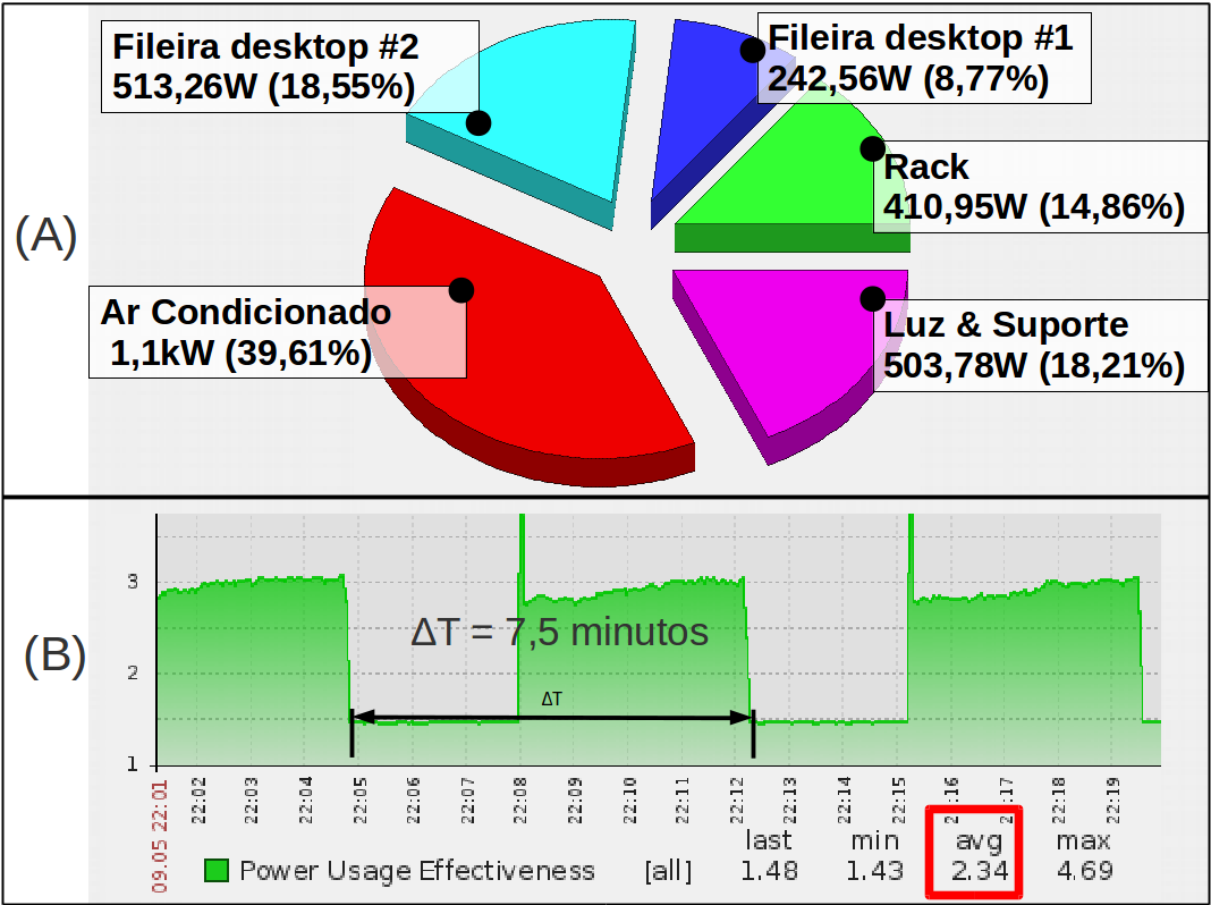
Em cada teste é mostrado um gráfico de setores, mostrando a proporção entre os cinco pontos monitorados, e um gráfico de tempo, mostrando o comportamento do PUE nos momentos em que o compressor do ar condicionado é acionado.

#### Teste 1: Temperatura a 18°C

Durante o intervalo de sete dias de monitoramento da temperatura à 18°C, constatou-se uma média de consumo de energia do equipamento de refrigeração de 1,13kWh por hora, equivalente ao consumo diário de 27,1kWh. O valor médio do PUE obtido nesse período é de 2,34 pontos, mostrando-se alto em relação aos demais testes realizados. De acordo com a Figura 6.5-B, no marcador  $\Delta T$ , o tempo médio entre os

acionamentos do compressor do gás refrigerante é de 7,5 minutos, distribuídos em 4,4 minutos ligado (58,67%) e 3,1 minutos desligado (41,33%). Este comportamento mostra uma frequência alta entre acionamentos do compressor e maior tempo em que o mesmo permanece ligado, quando comparado com demais testes, influenciando diretamente no valor médio do PUE. A Figura 6.5-A mostra a relação das demandas de consumo de energia entre os cinco sensores e a Figura 6.1-B mostra o gráfico de comportamento do PUE, apresentando o valor médio para o período selecionado de 18 minutos.

Figura 6.5: Gráfico das demandas (A) e PUE (B) em 18°C.



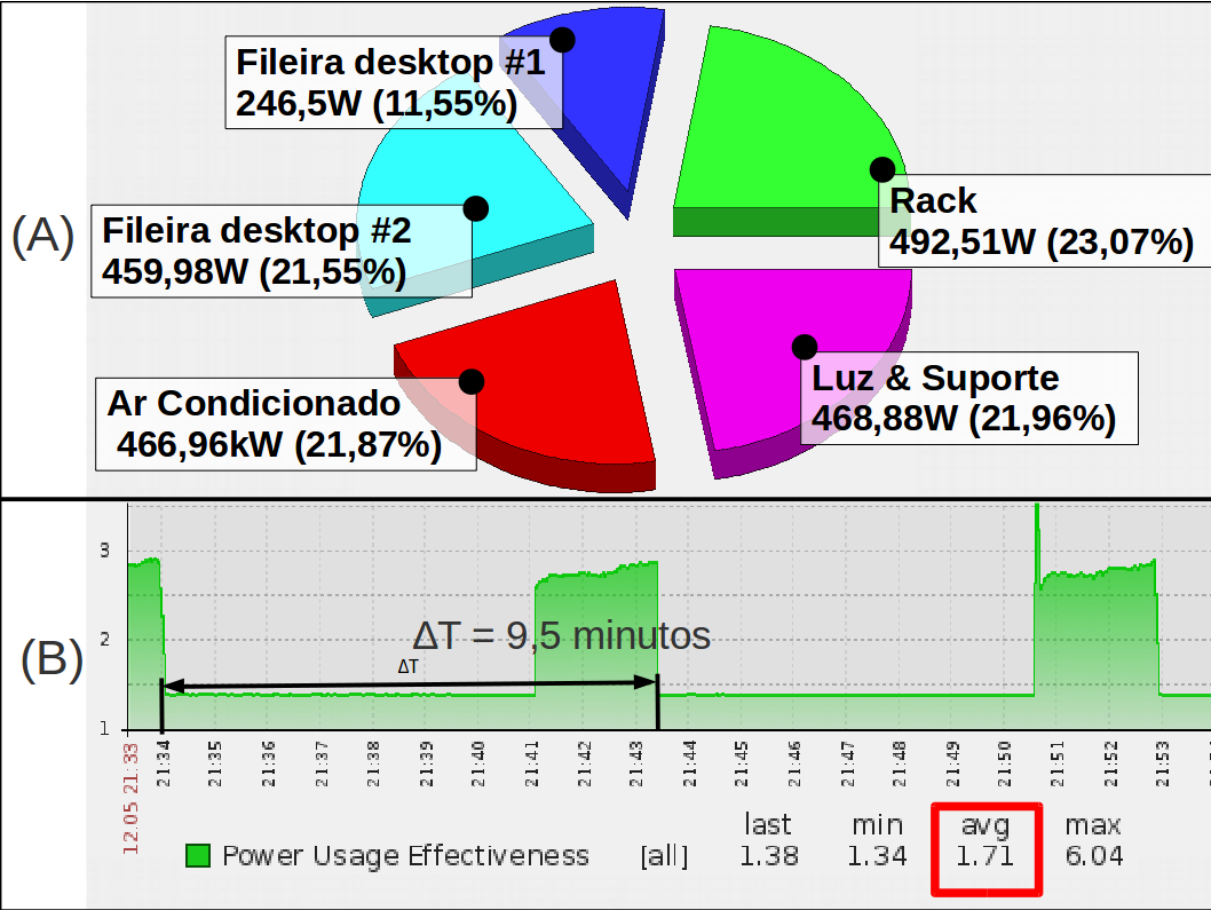
Fonte: O próprio autor.

Teste 2: Temperatura a 23°C

Durante o intervalo de monitoramento com a temperatura em 23°C, constatou-se uma média de consumo de energia de 521Wh por hora, o que corresponde a um valor médio diário de 12,5kWh. Em relação ao Teste 1, ao adotar a temperatura de

23°C para a operação da sala de servidores, obteve-se uma eficiência energética de 53,9%, sem que houvesse qualquer outra alteração no equipamento. O valor do PUE obtido foi de 1,71, mostrando uma redução em 0,63 pontos.

Figura 6.6: Gráfico das demandas (A) e PUE (B) em 23°C.



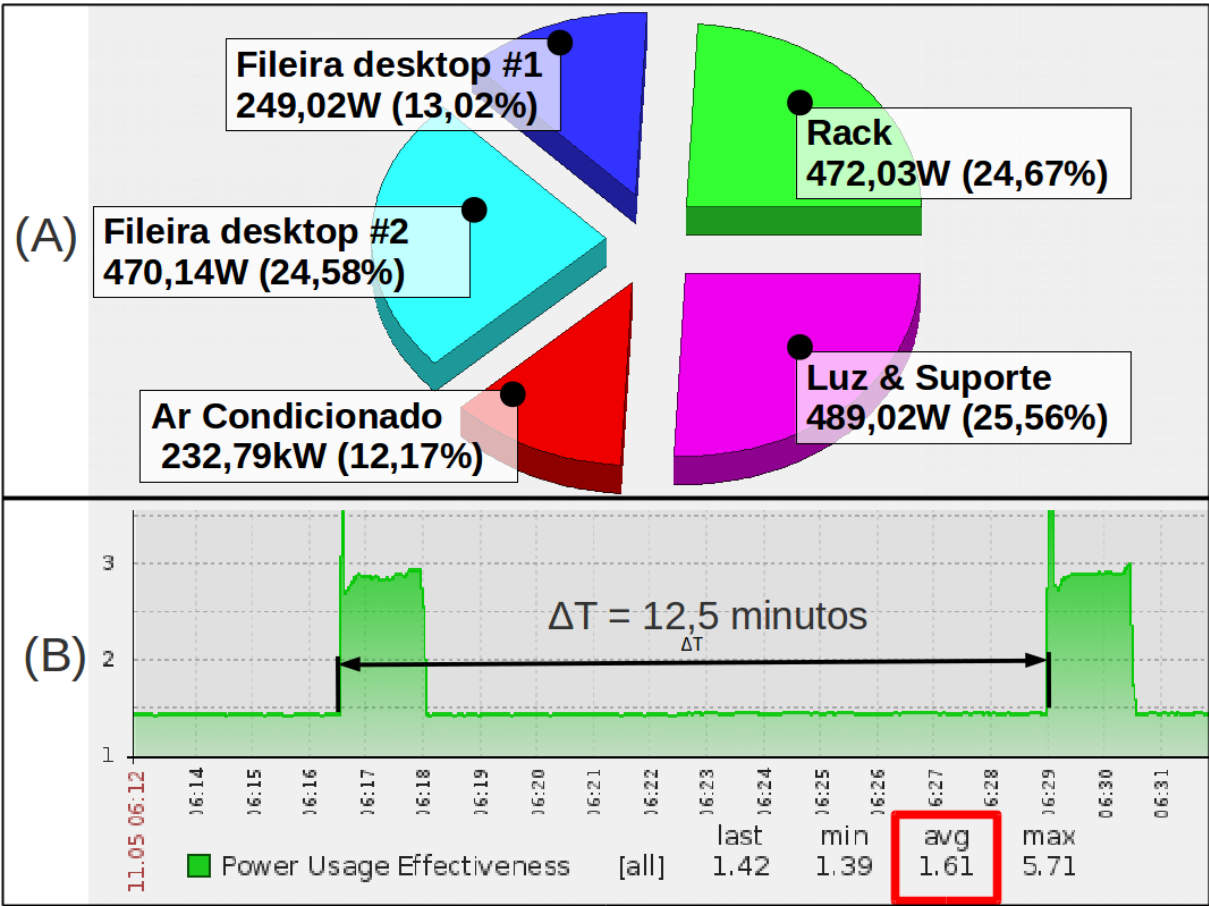
Fonte: O próprio autor.

De acordo com a Figura 6.6-B, no marcador  $\Delta T$ , o tempo médio entre os acionamentos do compressor é de 9,5 minutos, mostrando um período maior em relação ao Teste 1. Todavia, o período de tempo em que fica ligado, totaliza 2,5 minutos (28,6%) e desligado durante 7 minutos (71,4%). Este comportamento mostra uma menor frequência de acionamentos do compressor, quando comparado com o Teste 1, influenciando diretamente no valor médio do PUE. A relação das demandas de consumo de energia no período é mostrado na Figura 6.6-A. A Figura 6.6-B mostra o gráfico de comportamento do PUE, apresentando o valor médio para o período selecionado de 19 minutos.

Teste 3: Temperatura a 25°C

Durante o intervalo de monitoramento da temperatura em 25°C, constatou-se uma média de consumo de energia de 235Wh por hora, que resulta em um total diário de 5,64 kWh. A abordagem do Teste 3 corresponde a uma redução de 79,2% do consumo da refrigeração, quando comparado com o Teste 1 (temperatura em 18°C) e de 54,9% quando comparado com o Teste 2 (temperatura em 23°C). A média do valor do PUE obtida nesse teste é de 1,61 pontos, representando uma redução de 0,73 pontos em relação ao Teste 1.

Figura 6.7: Gráfico das demandas (A) e PUE (B) em 25°C.



Fonte: O próprio autor.

De acordo com a Figura 6.7-B, no marcador  $\Delta T$ , o tempo médio entre os acionamentos do compressor é de 12,5 minutos, mostrando um tempo maior que os Testes 1 e 2. Neste caso, assim como no Teste 2, a diferença está na distribuição do tempo em que fica ligado, permanecendo nesse estado por 1,5 minutos (12%) e

desligado durante 11 minutos (88%). Este comportamento mostra uma frequência decrescente de acionamentos do compressor, quando comparado com os Testes 1 e 2, que influencia diretamente no valor médio do PUE obtido. A relação das demandas de consumo de energia no período é mostrado na Figura 6.7-A. A Figura 6.7-B mostra o gráfico de comportamento do PUE, apresentando um período selecionado de 19 minutos.

#### **Teste 4: Free cooling**

A relação das demandas de consumo de energia no período (6.8-A) mostra que não há o consumo do equipamento do ar condicionado, embora os demais equipamentos continuem em funcionamento. A Figura 6.8-B mostra o gráfico de comportamento do PUE, que neste caso não existe as ondas quadradas (momentos em que o compressor está ligado), apresentando um período selecionado de 17 minutos.

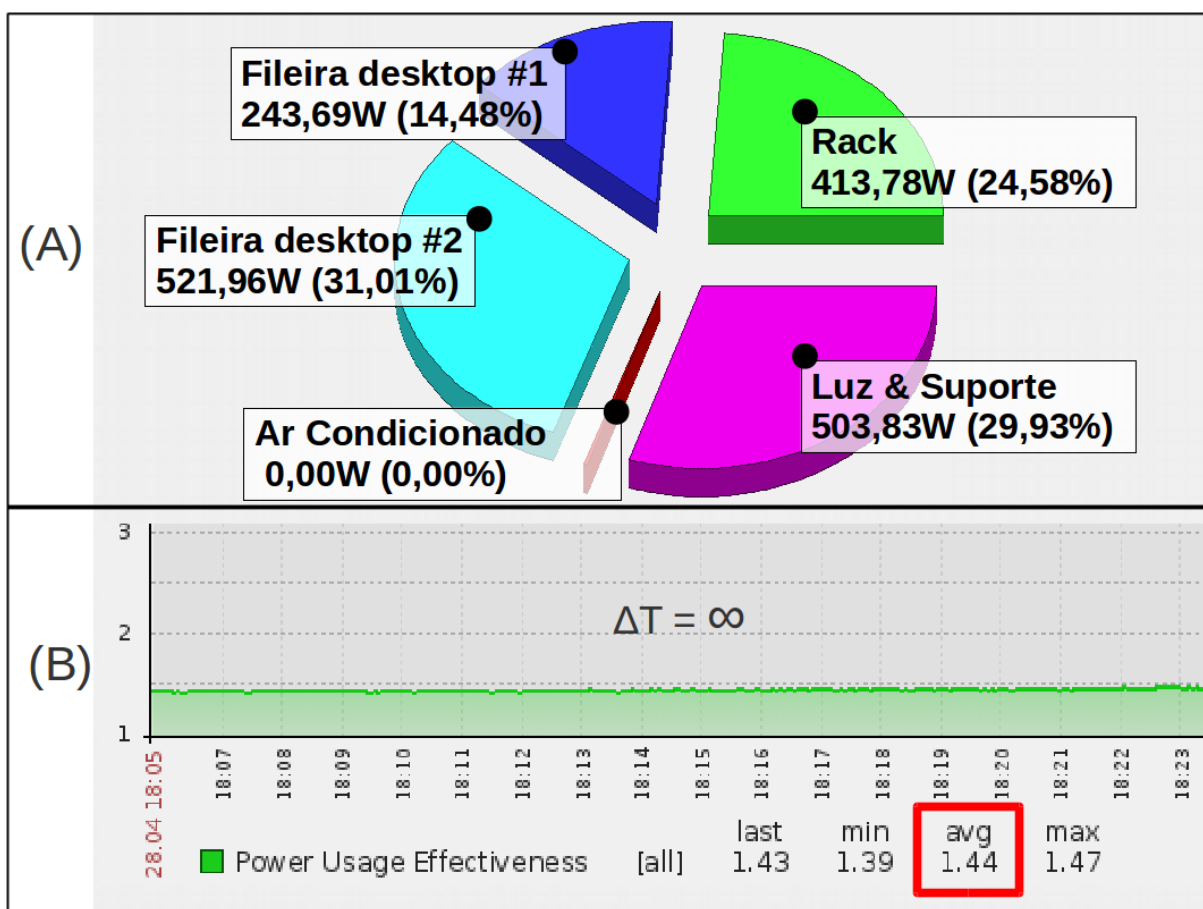
Embora o Teste 4 apresente o melhor valor do PUE, deve ser levado em conta se as condições ambientais estão de acordo com o estabelecido.

## **6.2 Consolidação e Análise dos resultados**

De forma unânime, todos os resultados permitiram identificar que não há necessidade de configurar o sistema de refrigeração em 18°C para manter o ambiente seguro para as operações de um DC. Manter a refrigeração dentro do limite de 20°C a 25°C especificado na norma TIA-942-A (Tabela E.1) já é suficiente.

### **6.2.1 Monitoramento ambiental**

Especificamente para os parâmetros ambientais, manter a temperatura em 25°C (Teste 3), permite obter uma ótima eficiência energética com o equipamento de refrigeração ligado, todavia extrapola os limites de umidade relativa da sala de servidores. O resultado da técnica do *free cooling*, em dias em que o clima externo é propício, mostra a possibilidade de se obter a máxima economia de energia possível. Porém, é necessário fazer o controle da umidade através de algum equipamento, mas que con-

Figura 6.8: Gráfico das demandas (A) e PUE (B) durante o *free cooling*.

Fonte: O próprio autor.

suma menos energia que um ar condicionado. Por fim, ao selecionar uma temperatura intermediária a faixa de valores estabelecida pela norma, o Teste 2 (23°C) mostra um consumo menor que o ocorrida a 18°C e maior que o consumo a 25°C. Todavia, a configuração da temperatura em 23°C mostrou-se a ideal, por manter a umidade relativa da sala de servidores dentro do estabelecido pela norma TIA-942-A, com um consumo aceitável de energia elétrica. A Tabela 6.1 apresenta todos os resultados consolidados dos experimentos realizados.

Na Tabela 6.1, as linhas dos parâmetros ambientais são comparados com os valores estabelecidos pela norma TIA-942-A. Já o consumo energético não possui a mesma comparação, pois seu valor deve ser o menor possível.

Tabela 6.1: Resultados dos experimentos dos parâmetros ambientais.

Requisitos	TIA-942	Teste 1	Teste 2	Teste 3	Free
	Min~Max	18°C	23°C	25°C	Cooling
TBS	20~25°C	18°C	23°C	25°C	19°C
Variação TBS/h	0~5°C/h	1,5°C/h	2°C/h	1,2°C/h	2°C/h
Ponto Orvalho	0~21°C	7°C	16°C	17°C	7°C
Umidade	40~55%	47%	52%	60%	47,5%
Consumo diário	–	27,1kWh	12,5kWh	5,64kWh	0,0Wh
Eficiência do equipamento	–	Base	53,9%	79,2%	100%
$\Delta T$ compressor	–	8,7 m	9,1 m	12,9 m	–
Compressor on	–	5,7 m	2,6 m	1,5 m	–
Compressor off	–	3 m	6,5 m	11,4 m	–

Fonte: O próprio autor.

### 6.2.2 Monitoramento do PUE

Os quatro testes realizados permitiram conhecer o comportamento do consumo de energia e o impacto que o equipamento de refrigeração tem no valor final do PUE. Os picos de potência no instantes da compressão do gás refrigerante, indicam o esforço necessário para tirar o motor da inércia, podendo-se deduzir que quanto menor a temperatura configurada, mais vezes será acionado o compressor e maior será a sua influência no consumo médio, aumento o PUE geral do DC. A Tabela 6.2 apresenta todos os resultados consolidados dos experimentos realizados em relação aos monitoramento do PUE.

Manter a temperatura em 18°C consome energia desnecessariamente. Ao configurar uma temperatura intermediária, o Teste 2 a 23°C mostra um consumo menor que em 18°C mas maior que o consumo em 25°C. Manter a temperatura em 25°C, no limite superior da norma, se obtém uma ótima eficiência energética, mesmo enquanto o equipamento de refrigeração está ligado. Porém, em dias em que o clima externo é propício, a técnica do *free cooling* mostra a possibilidade de se obter a



Tabela 6.2: Consolidação dos resultados dos experimentos do PUE.

Requisitos	Teste 1	Teste 2	Teste 3	Free
	18 °C	23 °C	25 °C	Cooling
PUE	2,34	1,71	1,61	1,44
DCiE	42,73%	58,47%	62,11%	69,44%
Consumo diário	27,1kWh	12,5kWh	5,64kWh	0,0Wh
Eficiência do equipamento	Base	53,9%	79,2%	100%
$\Delta T$ compressor	7,5 m	9,5 m	12,5 m	–
Compressor <i>on</i>	4,4 m	2,5 m	1,5 m	–
Compressor <i>off</i>	3,1 m	7,0 m	11,0 m	–

Fonte: O próprio autor.

máxima economia de energia, com o desligamento do equipamento de refrigeração. Todavia, considerando os resultados dos testes relativos ao monitoramento ambiental, é importante fazer um controle da umidade através de algum equipamento específico, mas que consuma menos energia que o equipamento de refrigeração configurado em 25 °C.

### 6.2.3 Considerações gerais sobre os resultados coletados

Ao considerar as duas avaliações simultaneamente, o monitoramento ambiental e do PUE, é possível concluir que a melhor temperatura de operação é a de 23 °C, pois mantém o parâmetros de umidade dentro dos requisitos estabelecidos pela norma TIA-942. Embora esta configuração não apresente a melhor eficiência energética, obter um ganho de eficiência de 53,9% apenas no equipamento de refrigeração garantindo as condições mínimas ambientais pode ser considerado como um grande benefício. Nesta configuração o PUE se mantém em 1,71 pontos e o DCiE se mantém em 58,47%.

Um fato interessante, que foi identificado nos experimentos, está relacionado ao uso das *triggers* do Zabbix, configuradas inicialmente para alterar a tempe-

ratura da sala através de comandos que emulam o protocolo do controle remoto do equipamento. Estes comandos são enviados através de um atuador de infravermelho configurado no nodo mais próximo do equipamento de ar condicionado (Nodo 6). A decisão de alterar essa temperatura é realizada no Banana Pi, através do acionamento da *trigger* configurada para executar um *script* ao ultrapassar um determinado limite, que envia o valor da temperatura desejada por rádio ZigBee até o nodo equipado com o sensor de infravermelho.

Foi constatado que o equipamento de refrigeração possui um mecanismo muito eficiente para manter a temperatura ajustada. Esse fato foi confirmado devido ao fato de não ter sido nenhuma vez invocado o *script* para alterar a temperatura do ar. De acordo com os dados analisados, não houve variações de temperatura fora da faixa de tolerância permitida.

As suposições iniciais indicavam que haveria uma necessidade de atuação constante para diminuir a temperatura durante o dia e aumentar durante a noite, supostamente mais frequentemente quando estava configurado para manter a temperatura em 23 °C. Ocasionalmente, em DCs que utilizam mais de um equipamento tipo *split* com a técnica de rodízio entre estes equipamentos. Esta é uma abordagem que pode ser utilizada não somente para alterar a temperatura sob demanda, mas também para ativar os equipamentos automaticamente para o revezamento ou no caso de falhas.

## 7 Considerações finais do TCC-II & Trabalhos futuros

Os resultados obtidos com a redução do PUE mostram que a aplicação da solução GreenHop é capaz de permitir a análise detalhada sobre o consumo energético, de reduzir custos operacionais e aumentar a eficiência dos processos com baixo investimento. Paralelamente, foram considerados os requisitos ambientais para encontrar a configuração ideal para o equipamento de refrigeração da sala de servidores do LabP2D. O uso das métricas PUE e DCiE possibilitam condensar em apenas um valor a relação entre todos os equipamentos do DC. É importante que um sistema de monitoramento mostre as possibilidades de melhorias nos processos, permitindo ter DCs de portes menores cada vez mais eficientes.

A solução GreenHop oferece a possibilidade de monitorar e controlar uma ampla gama de aspectos ambientais e energéticos dentro da sala de servidores de um ambiente de DC. Apesar da solução GreenHop ser expansível para incorporar outros sensores e atuadores, a versão apresentada neste trabalho foi elaborada para possibilitar o monitoramento específico para uma sala de servidores de um DC. De forma geral, constata-se que a solução GreenHop é satisfatória para as necessidades de monitoramento de diversos parâmetros, permitindo verificar se as ações que objetivam reduzir o consumo de energia não implicam em modificação nos parâmetros ambientais desejados.

Para manter os servidores e demais equipamentos operando de forma adequada é necessário mantê-los dentro das faixas de temperatura, umidade relativa, determinados pelas normas. Neste sentido, empresas que só possuem sala de servidores empregam sistemas de refrigeração (usualmente ar condicionado tipo *split*) configurados na temperatura mínima, em torno de 18 °C, elevam de forma desnecessária o consumo de energia elétrica. Soluções para gerenciamento e monitoramento DCIM são complexas e possuem alto custo de aquisição, não sendo atrativas para gestores de TI de pequenas e médias empresas. No entanto, mesmo para pequenas e médias instituições, é importante dispor de um sistema de monitoramento para con-

trolar os parâmetros ambientais, permitindo reduzir o consumo de energia elétrica ao mesmo tempo em que se conhece o comportamento ambiental da sala de servidores, mantendo-a dentro das normas vigentes.

A solução GreenHop possui algumas limitações oriundas das tecnologias que a compõe, sendo destacado o processamento e armazenamento no nodo coordenador, restrito ao uso de poucas dezenas de nodos. A grande quantidade de mensurações em conjunto com a alta frequência de coleta, geram um volume considerável de dados que exige um sistema de armazenamento com maior capacidade de atender as requisições de E/S com maior velocidade. Nos testes apresentados neste trabalho foi empregado um HD SATA de 2.5" de 256 GB alimentado por uma fonte externa. Estima-se que o uso de um computador *single board* de maior capacidade de processamento, em conjunto com uma unidade SSD, são suficientes para permitir a aplicação simultânea de algumas centenas a milhares de nodos. Salienta-se que os testes foram realizados no período do outono brasileiro, sendo a temperatura média na região nessa estação de 20 °C. A monitoração no LabP2D continua sendo realizada de modo a possibilitar uma análise mais ampla após o período de um ano, que deve ser completado em fevereiro de 2017.

O presente trabalho contribui para obter o conhecimento sobre a necessidade de manter os servidores e equipamentos de comunicação operando de modo adequado, mostrando que é necessário assegurar que está sendo operado dentro das faixas de temperatura e umidade relativa, determinados pelas normas técnicas. No entanto, é importante que o sistema de monitoramento analise os parâmetros ambientais e o consumo energético ao mesmo tempo em que mostra ao gestor as possibilidades de melhorias para tornar os processos relacionados ao DC mais eficientes.

## 7.1 Trabalhos futuros

Como trabalhos futuros, está prevista a adoção de métricas que definem a eficiência da refrigeração, como o *Rack Cooling Index* (RCI) e *Return Temperature Index* (RTI), que estabelecem um índice para a efetividade de refrigeração para o *rack* e da temperatura de retorno, respectivamente. Está em análise a integração do GreenHop com a plataforma OpenStack, para permitir uma solução de monitoramento não apenas por

sensoriamento externo, mas também incluindo os dados de consumo de energia internos em cada servidor. Está prevista a expansão do GreenHop para incluir um sistema de segurança para controle de acesso ao laboratório através de cartões RFID e sensores de presença. Os nodos finais também terão a adição de sensores de desastres, como fumaça e chamas para a detecção de incêndio e piso molhado para alerta de inundação. Complementarmente, será configurado no Zabbix a notificação remota por e-mail/SMS ao responsável do laboratório, para os casos definidos como críticos.

Em uma atualização futura, pretende-se substituir as fontes de energia dos nodos finais e do Banana Pi por baterias de lítio recarregáveis, afim de manter o sensoriamento em caso de falta de energia elétrica do local. Testes com outras opções de componentes estão em vias de realização, na medida em que novos sensores, microcontroladores, rádios e computadores single board estão sendo adquiridos.

## **7.2 Cronograma**

O cronograma proposto no Plano de TCC foi realizado conforme o definido, dentro dos prazos estipulados e dentro da ordem especificada. Com o início da coleta de dados no mês de novembro, o presente trabalho iniciou adiantado, permitindo que mais testes fossem executados. Por fim o cronograma proposto na Tabela 7.1 organiza estas etapas

### **7.2.1 Etapas realizadas**

As etapas do projeto que já foram realizadas estão enumeradas da seguinte forma:

1. Levantamento bibliográfico;
2. Levantamento de sistemas similares já existentes;
3. Análise dos componentes de hardware e software para o sistema;
4. Montagem e testes de mesa dos sensores, atuadores e RSSF;
5. Início da coleta de dados;
6. Adição de sensores de segurança;

7. Adição das funcionalidades de acesso remoto e PUE em tempo real;
8. Realizar análises sobre os dados coletados;
9. Escrever sobre os resultados das análises; e
10. Publicar artigo científico em evento.

### 7.2.2 Cumprimento do cronograma

A Tabela 7.1 relaciona na cor preta as etapas já concluídas.

Tabela 7.1: Cumprimento do cronograma no TCC.

Etapas	2015					2016						
	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul
1												
2												
3												
4												
5												
6												
7												
8												
9												
10												

Fonte: O próprio autor.

## Referências Bibliográficas

- ABBAS, C. J. B.; OROZCO, A. L. S.; VILLALBA, L. J. G. Monitoring of Data Centers using Wireless Sensor Networks. In: KHAN, S. U.; ZOMAYA, A. Y. (Ed.). *Handbook on Data Centers*. Springer New York, 2015. p. 1171–1183. ISBN 978-1-4939-2091-4 978-1-4939-2092-1. DOI: 10.1007/978-1-4939-2092-1\_40. Disponível em: <[http://link.springer.com/chapter/10.1007/978-1-4939-2092-1\\_40](http://link.springer.com/chapter/10.1007/978-1-4939-2092-1_40)>.
- ANDREA, M.; WALLACE, B. *Data Center Size and Density Standards*. [S.l.], 2014. 19 p.
- ARGHODE, V. et al. Anemometric tool for air flow rate measurement through perforated tiles in a raised floor data center. In: *Thermal Measurement, Modeling Management Symposium (SEMI-THERM), 2015 31st*. [S.l.: s.n.], 2015. p. 163–171.
- ARNO, R. et al. Reliability of Data Centers by Tier Classification. *IEEE-IA*, p. 777–783, mar. 2012. ISSN 0093-9994.
- AROCA, J. A. *Eficiencia energética en los centros de datos*. Dissertação (Mestrado) — Universitat Politècnica de València, València, España, 2016. Disponível em: <<https://riunet.upv.es/handle/10251/59814>>.
- ASHRAE. *Real-Time Energy Consumption Measurements in Data Centers: ASHRAE Datacom*. Atlanta, GA: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 2010. (ASHRAE datacom series, 9). ISBN 978-1-933742-73-1. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=jfKrcQAACAAJ>>.
- BAILEY, M. et al. *International Data Corporation Special Study: Data Center of the Future*. abr. 2007.
- BALTER, B. *Open-Source Alternatives to Proprietary Enterprise Software*. 2015. Disponível em: <<http://ben.balter.com/open-source-alternatives/>>.
- BEAMISH, B. Meeting, *DCIM Myths and Realities*. BICSI Canadian Region Meeting, Ottawa, ON, Canada: [s.n.], nov. 2012.

BELL, M. A. *Use Best Practices to Design Data Center Facilities*. [S.l.], abr. 2005. 26 p. Disponível em: <<https://www.gartner.com/doc/476880/use-best-practices-design-data>>.

BHAGWAT, H. et al. Thermal influence indices: Causality metrics for efficient exploration of data center cooling. In: *Green Computing Conference (IGCC), 2012 International*. [S.l.: s.n.], 2012. p. 1–10.

BIANZINO, A. P.; RAJU, A. K.; ROSSI, D. Apples-to-apples: A Framework Analysis for Energy-efficiency in Networks. *SIGMETRICS Perform. Eval. Rev.*, v. 38, n. 3, p. 81–85, jan. 2011. ISSN 0163-5999. Disponível em: <<http://doi.acm.org/10.1145/1925019.1925036>>.

BROWN, R. E. et al. Report to Congress on Server and Data Center Energy Efficiency: Public Law 109-431. *Lawrence Berkeley National Laboratory*, n. LBNL- 363E, p. 137, jun. 2008. Disponível em: <[https://ses.lbl.gov/sites/all/files/pdf\\_1.pdf](https://ses.lbl.gov/sites/all/files/pdf_1.pdf)>.

BURATTI, C. et al. An Overview on Wireless Sensor Networks Technology and Evolution. *Sensors*, v. 9, n. 9, p. 6869–6896, ago. 2009. ISSN 1424-8220. Disponível em: <<http://www.mdpi.com/1424-8220/9/9/6869/>>.

CHEN, S.; IRVING, S.; PENG, L. Operational Cost Optimization for Cloud Computing Data Centers Using Renewable Energy. *IEEE Systems Journal*, PP, n. 99, p. 1–12, 2015. ISSN 1932-8184.

COMERFORD, T. *How Data Center Operators Can Avoid Energy Price Hikes This Winter*. jan. 2015. Disponível em: <<http://www.datacenterknowledge.com/archives/2015/01/29/data-center-operators-can-avoid-energy-price-hikes-winter/>>.

CONGDON, L. *8 advantages of using open source in the enterprise | The Enterprisers Project*. fev. 2015. Disponível em: <<https://enterprisersproject.com/article/2015/1/top-advantages-open-source-offers-over-proprietary-solutions>>.

DAI, J. et al. Data center energy flow and efficiency. In: *Optimum Cooling of DCs*. [S.l.]: Springer NY, 2014. p. 9–30. ISBN 978-1-4614-5601-8, 978-1-4614-5602-5.

DAVID, M.; SCHMIDT, R. Impact of ASHRAE environmental classes on data centers. In: *2014 IEEE ITherm*. [S.l.: s.n.], 2014. p. 1092–1099.



DELFORGE, P. *America's Data Centers Consuming and Wasting Growing Amounts of Energy*. 2014. Disponível em: <<http://www.nrdc.org/energy/data-center-efficiency-assessment.asp>>.

EMBRATEL-Teleco. Institucional, *A Conectividade das Empresas Brasileiras*. 2015.

EMERSON-NETWORK, P. *Energy Logic 2.0 New Strategies for Cutting Data Center Energy Costs and Boosting Capacity*. [S.l.], 2012. 39 p.

FERNANDEZ, R. O uso de softwares livres na gestão pública de acervos informacionais: o caso do Koha nas bibliotecas de São Bernardo do Campo. *Informação & Informação*, v. 18, n. 2, p. 231–248, 2013. ISSN 1981-8920. Disponível em: <<http://www.uel.br/revistas/uel/index.php/informacao/article/view/16174>>.

FILHO, M. F.; NETO, M. F. *Data Center Infrastructure Management and Automation Systems: an Evaluation Method*. nov. 2012.

GENG, H. *Data Center Handbook*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2014. ISBN 978-1-118-93757-0.

GENOVA, F. et al. Management system based on low cost wireless sensor network technology, to monitor, control and optimize energy consumption in telecom switch plants and data centres. In: *2009 4th ESCON*. [S.l.: s.n.], 2009. p. 1–8.

GISLASON, D. *Zigbee Wireless Networking*. [S.l.]: Newnes, 2008. ISBN 9780080558622.

GOLDHAR, M. P. *Um framework de métricas de produtividade e eficiência energética em data centers*. Tese (Dissertação) — UFPE, Recife, 2009. Disponível em: <<http://repositorio.ufpe.br:8080/xmlui/handle/123456789/2306>>.

HELLER, B. et al. ElasticTree: Saving Energy in Data Center Networks. *NSDI*, v. 10, p. 249–264, 2010. Disponível em: <[http://www.usenix.org/event/nsdi10/tech/full\\_papers-/heller.pdf](http://www.usenix.org/event/nsdi10/tech/full_papers-/heller.pdf)>.

HOOGENDOORN, B.; GUERRA, D.; ZWAN, P. v. d. What drives environmental practices of SMEs? *Small Bus Econ*, v. 44, n. 4, p. 759–781, nov. 2014. ISSN 0921-898X, 1573-0913. Disponível em: <<http://link.springer.com/article/10.1007/s11187-014-9618-9>>.

IBM Knowledge Center. *Critérios de Design Ambiental para instalação do servidor POWER7*. set. 2013. Disponível em: <<http://www-01.ibm.com/support/knowledge-center/api/content/nl/pt-br/POWER7/p7ebe/p7ebetempandhumiditydesign.htm>>.

JOKONYA, O. Investigating Open Source Software Benefits in Public Sector. In: *2015 48th HICSS*. [S.l.: s.n.], 2015. p. 2242–2251.

KHAN, S. U.; ZOMAYA, A. Y. *Handbook on Data Centers*. [S.l.]: Springer, 2015. ISBN 978-1-4939-2092-1.

KOHVAKKA, M. et al. Performance analysis of ieee 802.15.4 and zigbee for large-scale wireless sensor network applications. In: *Proceedings of the 3rd ACM International Workshop on Performance Evaluation of Wireless Ad Hoc, Sensor and Ubiquitous Networks*. New York, NY, USA: ACM, 2006. (PE-WASUN '06), p. 48–57. ISBN 1-59593-487-1. Disponível em: <<http://doi.acm.org/10.1145/1163610.1163619>>.

LI, Y.; THAI, M. T.; WU, W. (Ed.). *Wireless Sensor Networks and Applications*. Boston, MA: Springer US, 2008. (Signals and Communication Technology). ISBN 978-0-387-49591-0 978-0-387-49592-7. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1007/978-0-387-49592-7>>.

LIAPERDOS, I. et al. Building a low-cost network for power-quality monitoring with open-source-hardware nodes. In: *7th MedPower 2010*. [S.l.: s.n.], 2010. p. 1–5.

LIM, J.; LIM, H.; KANG, S. 3d Stacked DRAM Refresh Management with Guaranteed Data Reliability. *IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems*, PP, n. 99, p. 1–1, 2015. ISSN 0278-0070.

MAHDAVI, R. *Data Center Energy Efficiency Measurement Assessment Kit Guide and Specification*. Lawrence Berkeley National Laboratory, jul. 2014. 20 p. Disponível em: <<https://datacenters.lbl.gov/resources/data-center-energy-efficiency>>.

MARIK, O.; ZITTA, S. Comparative analysis of monitoring system for data networks. In: *2014 International Conference on Multimedia Computing and Systems (ICMCS)*. [S.l.: s.n.], 2014. p. 563–568.

MATSUMOTO, K. et al. Proposal of Sensor Data Gathering with Single Board Computer. In: *2013 27th International Conference on Advanced Information Networking and Applications Workshops (WAINA)*. [S.l.: s.n.], 2013. p. 162–167.

- MESCHERYAKOV, S.; SHCHEMELININ, D.; EFIMOV, V. Adaptive control of cloud computing resources in the Internet telecommunication multiservice system. In: *2014 6th International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops (ICUMT)*. [S.l.: s.n.], 2014. p. 287–293.
- MITTAL, S. Power Management Techniques for Data Centers: A Survey. *CoRR*, abr. 2014. ArXiv: 1404.6681.
- MOGAMI, S.; RODRIGUES, S. Data centers para pequenas empresas. *Revista RTI*, v. 167, p. 20, 2014.
- MORABITO, R. Power Consumption of Virtualization Technologies: an Empirical Investigation. *IEEE/ACM UCC 2015 SD3C*, IEEE, 2015. Disponível em: <<http://arxiv.org/abs/1511.01232>>.
- MURUGESAN, S.; GANGADHARAN, G. R. *Harnessing Green IT: Principles and Practices*. 1. ed. UK: Wiley, 2012. ISBN 9781119970057.
- NETO, M. F. *Os principais sistemas de automação de data centers do mercado - DCIM*. [S.l.], 2013. 17 p.
- NETO, M. F. *Os principais sistemas de automação de data centers do mercado - DCIM: uma visão técnica e metodologias de escolha*. 6th NetComm, SP: [s.n.], 2013.
- PAIM, R. et al. *Gestão de Processos: Pensar, Agir e Aprender*. Porto Alegre: Bookman, 2009. ISBN 9788577804849.
- PARK, S. et al. Design and Implementation of Smart Energy Management System for Reducing Power Consumption Using ZigBee Wireless Communication Module. *Procedia Computer Science*, v. 19, p. 662–668, 2013. ISSN 1877-0509. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877050913006960>>.
- PATRICK, D. R.; FARDO, S. W. *Electrical Distribution Systems*. [S.l.]: The Fairmont Press, Inc., 2008. ISBN 978-0-88173-600-7.
- PEGUS II, P. et al. Analyzing the Efficiency of a Green University Data Center. In: *Proceedings of the 7th ACM/SPEC on International Conference on Performance Engineering*. New York, NY, USA: ACM, 2016. (ICPE '16), p. 63–73. ISBN 978-1-4503-4080-9. Disponível em: <<http://doi.acm.org/10.1145/2851553.2851557>>.

PULTZ, J. E. et al. *Magic Quadrant for Data Center Infrastructure Management Tools*. [S.l.], set. 2014. 17 p.

RAGUVARAN, K.; THIYAGARAJAN, J. Raspberry PI based global industrial process monitoring through wireless communication. In: *2015 International Conference on Robotics, Automation, Control and Embedded Systems (RACE)*. [S.l.: s.n.], 2015. p. 1–6.

RODRIGUEZ, M. et al. Wireless sensor network for data-center environmental monitoring. In: *2011 5th ICST*. [S.l.: s.n.], 2011. p. 533–537.

RUBENSTEIN, B.; FAIST, M. DC cold aisle set point optimization through total operating cost modeling. In: *IEEE-ITherm*. [S.l.: s.n.], 2014. p. 1111.

SANCHEZ, O. P.; CAPPELLOZZA, A. Antecedents of the adoption of cloud computing: effects of infrastructure, investment and size. *Revista de Administração Contemporânea*, v. 16, n. 5, p. 646–663, out. 2012. ISSN 1415-6555.

SATO, M. et al. Seeking an energy-efficient modular data center: impact of pressure loss on the server fan power. In: *2015 International Conference on Electronics Packaging and iMAPS All Asia Conference (ICEP-IACC)*. [S.l.: s.n.], 2015. p. 617–622.

SEVERANCE, C. Massimo banzi: Building arduino. *Computer*, v. 47, n. 1, p. 11–12, jan 2014. ISSN 0018-9162.

SHARMA, B. *Applications of Data Mining in the Management of Performance and Power in Data Centers*. [S.l.], 2009.

SILVA, F. C. *e-Book - Data Centers (CPD) para pequenas e médias empresas*. [S.l.], abr. 2015. 39 p.

SINGH, S. *Hand Book of Mechanical Engineering*. [S.l.]: S. Chand, 2011. ISBN 978-81-219-3587-6.

STANSBERRY, M. White Paper, *Uptime Institute - Data Center Industry Survey 2013*. [S.l.]: Uptime Institute, 2013.

SUNG, W.-T.; HSU, Y.-C. Designing an Industrial Real-time Measurement and Monitoring System Based on Embedded System and ZigBee. *Expert Syst*.

*Appl.*, v. 38, n. 4, p. 4522–4529, abr. 2011. ISSN 0957-4174. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.eswa.2010.09.126>>.

SYMANSKI, D.; WATKINS, C. 380vdc Data Center at duke energy. *Emerging Technology Summit at Electric Power Research Institute*, v. 9, Nov 2010.

THIBODEAU, P. *Data centers are the new polluters*. ago. 2014. Disponível em: <<http://www.computerworld.com/article/2598562/data-center/data-centers-are-the-new-polluters.html>>.

TIA-942, . *ANSI/TIA-942 - Telecommunications Infrastructure Standard for Data Centers*. [S.l.], 2005. 148 p.

TIAONLINE.ORG, P. R. Standard, *TIA Issues New Telecommunications Infrastructure Standard on Data Center Switch Fabrics in Order to Support Cloud Computing Growth*. 2013. Disponível em: <<http://www.tiaonline.org/news-media/press-releases-/tia-issues-new-telecommunications-infrastructure-standard-data-center>>.

TURNER, V. et al. *The Digital Universe of Opportunities: Rich Data and the Increasing Value of the Internet of Things*. USA, abr. 2014. 10 p. Disponível em: <<http://www.emc.com/leadership/digital-universe/2014iview/executive-summary.htm>>.

U.S. Department of Energy. *Data Center Master List of Energy Efficiency Actions*. Lawrence Berkeley National Laboratory, fev. 2016. 48 p. Disponível em: <<https://datacenters.lbl.gov/resources/data-center-master-list-energy>>.

VERAS, M. *DATACENTER - Componente central de infraestrutura de TI*. Rio de Janeiro: BRASPORT, 2009. ISBN 978-85-7452-416-0.

VILLARS, R. L.; SHIRER, M. *IDC Finds Growth, Consolidation, and Changing Ownership Patterns in Worldwide Datacenter Forecast*. nov. 2014. Disponível em: <<http://www.idc.com/getdoc.jsp?containerId=prUS25237514>>.

VOLK, E. et al. Improving energy efficiency in data centers and federated cloud environments: Approaches and metrics. In: *2013 3rd CGC*. [S.l.: s.n.], 2013. p. 443–450.

WANG, L.; KHAN, S. U. Review of performance metrics for green DC: a taxonomy study. *The Journal of Supercomputing*, p. 639–656, oct 2011. ISSN 0920-8542, 1573-0484.

WANG, X. et al. A survey of green mobile networks: Opportunities and challenges. *MNA*, p. 4–20, feb 2012. ISSN 1383-469X, 1572-8153.

WIBOONRAT, M. Data center infrastructure management WLAN networks for monitoring and controlling systems. In: *2014 ICOIN*. [S.l.: s.n.], 2014. p. 226–231.

YE, H.; SONG, Z.; SUN, Q. Design of green data center deployment model based on cloud computing and TIA942 heat dissipation standard. In: *2014 IEEE IWECA*. [S.l.: s.n.], 2014. p. 433–437.

YICK, J.; MUKHERJEE, B.; GHOSAL, D. Wireless Sensor Network Survey. *Comput. Netw.*, v. 52, n. 12, p. 2292–2330, ago. 2008. ISSN 1389-1286. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.comnet.2008.04.002>>.

ZHANG, Y. et al. Temperature-aware software-based self-testing for delay faults. In: *Design, Automation Test in Europe Conference Exhibition (DATE), 2015*. [S.l.: s.n.], 2015. p. 423–428.

## A Apêndice: Código Fonte do projeto GreenHop

Um dos principais destaques do GreenHop é ser uma solução de software e hardware livre, *i.e.*, *Open Source*. Para possibilitar que o material seja disponibilizado para uso, estudo, distribuição e modificação, os códigos-fonte foram organizados no provedor SourceForge, e pode ser acessado pelo link: <http://greenhop.sourceforge.net>. Neste espaço é possível acessar o repositório GIT do projeto, bem como a documentação técnica na Wiki.

O sistema de controle de revisão distribuída (GIT) permite que a comunidade interaja com a evolução do projeto, através do método de desenvolvimento colaborativo. A disponibilização do projeto para a comunidade *Open Source* conclui o objetivo inicial deste trabalho, que é criar uma solução *Open Source* para sala de servidores.

Na página da solução GreenHop é possível encontrar os códigos em Python, Unix Shell Script e C++ (Arduino), bem como todos os detalhes para configuração do Zabbix, Banana Pi, Raspbian e rádios ZigBee. De forma complementar, são disponibilizados os diagramas e esquemáticos para construção dos circuitos eletrônicos que compõem a parte de hardware da solução GreenHop no próximo apêndice.

## B Apêndice: Diagramas e esquemáticos do hardware utilizado

Nesta seção serão descritos os esquemáticos para o desenvolvimento do circuito dos filtros utilizados nos sensores de corrente elétrica, bem como o circuito do sensor DHT22, utilizado para medir temperatura e umidade.

### Sensor de corrente elétrica SCT-013

Os sensores de corrente elétrica da família SCT-013 são transformadores de corrente (TC) do tipo não-invasivo que possuem um núcleo de ferrite aberto. São utilizados para medir o consumo de energia elétrica através do campo magnético, oriundo da corrente alternada, de apenas um cabo de energia (fase ou neutro, mas não ambos).

Normalmente, estes sensores são encontrados no mercado com uma capa de plástico, que permite envolver o fio com uma trava que o mantém fixo (Figura B.1), todavia outros tipos de sensores podem ser utilizados no projeto. Embora não tenham sido testados outros sensores, basta adequar o código do Arduino com as características do sensor escolhido, como o número de voltas e a corrente máxima suportada.



Figura B.1: Fotografia do sensor SCT-013-000.

Para possibilitar a ligação deste sensor no Arduino, são necessários alguns componentes para fazer o filtro divisor de corrente:



- 1x resistor Burden de 18 Ohms se alimentado no 3.3V ou 33 Ohms se alimentado no 5V do Arduino;
- 2x resistor 470kOhm (para divisor de voltagem);
- 1x capacitor de 10uF;
- 1x *breadboard* com alguns fios (*jumpers*);
- 1x jack fêmea 3,5mm (fêmea para plug de fone de ouvido);
- 1x sensor tipo SCT-013 e um Arduino.

O esquemático para ligação dos componentes segue abaixo:

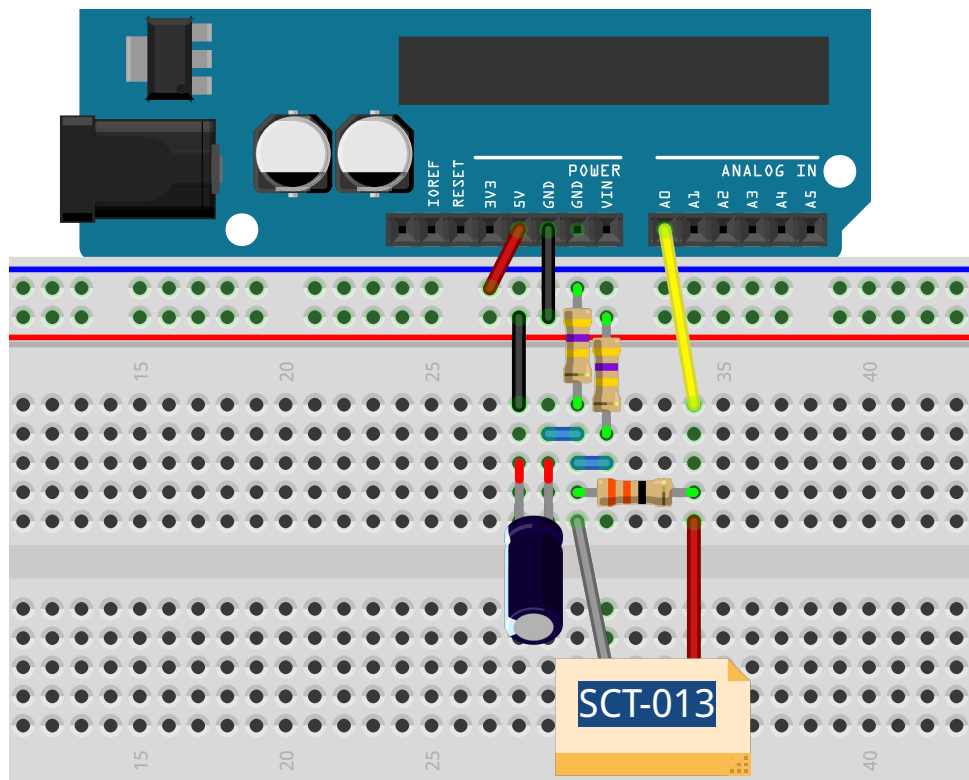


Figura B.2: Esquemático do filtro divisor de corrente.

## Sensor de temperatura e umidade DHT22

Este é um sensor que mede simultaneamente a temperatura e a umidade. Possui quatro pinos, mas são utilizados apenas três pinos: 1, 2 e 4. Além do Arduino, *breadboard*,

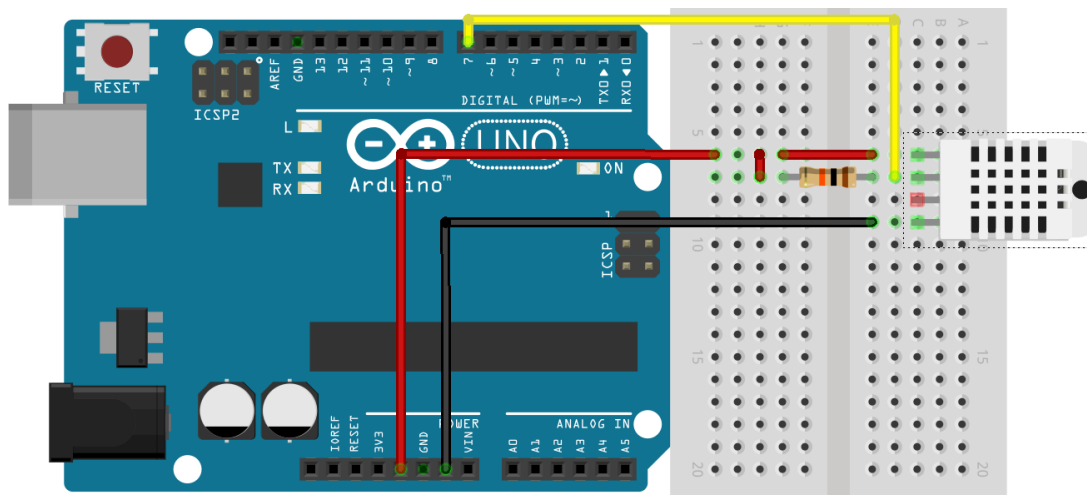


Figura B.3: Esquemático do sensor DHT22.

*jumpers* e o sensor DHT22, é necessário um resistor *pull-up* de 10kOhms para garantir o bom funcionamento. A Figura B.3 mostra um exemplo simples do esquemático.

É possível encontrar variações de como pode ser conectado o DHT22, desde ligações diretas a ligações mais complexas.

## C Apêndice: Artigos Publicados

O presente trabalho é uma continuação dos estudos realizados durante o Projeto de Pesquisa, realizado entre agosto de 2014 a agosto de 2015. Como fruto do trabalho realizado, foram publicados artigos em simpósios e fóruns de Iniciação Científica. Neste Apêndice, segue uma lista dos trabalhos publicados, bem como a descrição dos trabalhos que não foram aceitos.

### Artigos aceitos e publicados

- CAMARGO, D. S.; MIERS, C. C. Automação climática em sala de servidores utilizando hardware livre, *Apresentação de palestra e publicação em revista, Latinoware-PR*, 8 páginas, 2014.
- CAMARGO, D. S.; MIERS, C. C. Monitoramento Ambiental Open Source para Data Center, *I Escola Regional de Alto Desempenho do Rio de Janeiro* (SBC - ERAD-RJ), 2 páginas, 2015 .
- CAMARGO, D. S.; MIERS, C. C. Sensoriamento climático em sala de servidores utilizando soluções de software e hardware livre, *Anais do Computer on the Beach*, 3pgs 389–391, 2015.
- CAMARGO, D. S.; MIERS, C. C. Automação climática em sala de servidores utilizando hardware livre, *XV Escola Regional de Alto Desempenho do Rio Grande do Sul – (SBC - ERAD-RS)*, 4pgs 177–180, Abril, 2015.
- CAMARGO, D. S.; MIERS, C. C. Sensoriamento em Sala de Servidores Baseado em Software e Hardware Livres, *25º Seminário de Iniciação Científica da UDESC* (SIC – UDESC), 2015.
- CAMARGO, D. S.; MIERS, C. C. Métrica PUE para pequenos Data Centers utilizando software e hardware livre, *XVI Escola Regional de Alto Desempenho do Rio Grande do Sul – (SBC - ERAD-RS)*, 4pgs 295–298, Abril, 2016.

- CAMARGO, D. S.; MIERS, C. C. Greenhop: Monitoramento Ambiental e Energético em Data Centers de Pequeno Porte, *XXVII Congresso Regional de Iniciação Científica e Tecnológica em Engenharia – (CRICTE 2016)*, 12pgs. Joinville, SC. Julho, 2016.

## Artigos submetidos e aguardando aprovação

- CAMARGO, D. S.; MIERS, C. C. GreenHop: Open Source Environmental Monitoring for Small and Medium Data Centers, *XLII Conferencia Latinoamericana en Informática – (CLEI2016)*, 12pgs. Valparaíso, Chile. Outubro, 2016.
- CAMARGO, D. S.; MIERS, C. C. GreenHop: Open source PUE continuous monitoring for small and medium data centers, *XLII Conferencia Latinoamericana en Informática – (CLEI2016)*, 12pgs. Valparaíso, Chile. Outubro, 2016.
- CAMARGO, D. S.; STOEVEER, C.; MIERS, C. C. Monitoramento de PUE para data centers de pequeno porte, *VII Escola Regional de Alto Desempenho de São Paulo – (SBC - ERAD-SP)*, 4pgs. São Paulo, SP. Agosto, 2016.
- CAMARGO, D. S.; MIERS, C. C. Monitoramento de PUE para data centers de pequeno porte, *II Escola Regional de Alto Desempenho do Rio de Janeiro – (SBC - ERAD-RJ)*, 2pgs. Rio de Janeiro, RJ. Julho, 2016.

## Artigos submetidos e não aprovados

- CAMARGO, D. S.; MIERS, C. C.; G. P. KOSLOVSKI; PILLON M. A.; CARVALHO T. C. M. B.; REDIGOLO F. F.; ROJAS M. A. T. Sensoreamento e automação climática com redes de sensores sem fios em sala de servidores utilizando software e hardware livres. Minicurso para *XXXIII Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos – (SBRC2015)*, 48pgs, 2015.
- CAMARGO, D. S.; MIERS, C. C. GreenHop: monitoring the data center environment with open source software and hardware, *XLI Conferencia Latinoamericana en Informática – (CLEI2015)*, 10pgs. Arequipa, Perú. 2015.

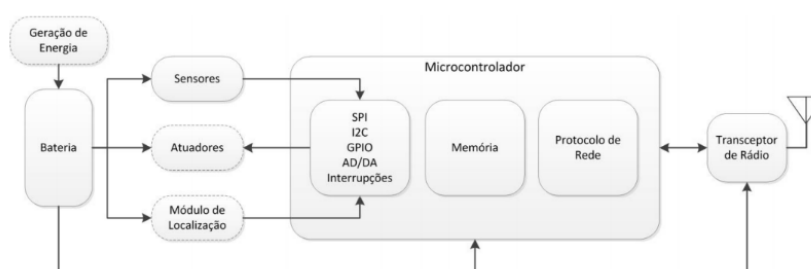
- CAMARGO, D. S.; MIERS, C. C. GreenHop: monitoring the data center environment with open source software and hardware, *16th IEEE/ACM International Symposium on Cluster, Cloud and Grid Computing – (CCGRID2016)*, 12pgs. Cartagena, Colombia. 2016.
- CAMARGO, D. S.; MIERS, C. C. GreenHop: Gerenciamento de PUE em sala de servidores utilizando software e hardware livre, *43º Seminário Integrado de Software e Hardware – (SEMISH 2016)*, 12pgs. Porto Alegre, RS. Julho, 2016.

## D Apêndice: Revisão Bibliográfica

### Redes de Sensores Sem Fio (RSSF)

Uma RSSF pode ser definida como uma rede composta por nós sensores que, cooperativamente monitoram e podem controlar o ambiente. Dessa forma, constituem uma tecnologia emergente que habilita uma funcionalidade sem precedentes de interação entre pessoas, computadores e o ambiente à sua volta (BURATTI et al., 2009). Os nós sensores, em uma RSSF típica, são capazes de medir variáveis em um determinado ambiente, por meio de sensores ou transdutores, e transmitir esses dados por meio de ondas eletromagnéticas para outras estações da rede. Para tanto, esses nós possuem componentes comuns, tais como transceptor de rádio, sensores, fonte de energia e microcontrolador. Opcionalmente, nós sensores, podem incluir módulos de localização, geração de energia e atuadores. Na Figura D.1 é apresentada uma descrição de alto nível de um nó sensor genérico.

Figura D.1: Descrição em alto nível de um nodo sensor.

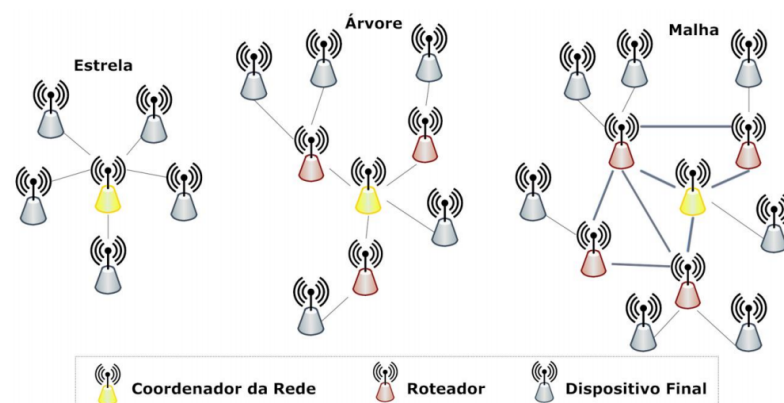


Fonte: Adaptado de [LOUREIRO 2006].

Uma RSSF possui um nó sorvedouro (*sink node*) responsável por receber os dados das leituras realizadas pelos nós sensores e repassá-las a um computador. Esse computador pode possuir soluções de software capazes de realizar o gerenciamento e configuração da RSSF, armazenar os dados recebidos e tomar decisões de acordo com a interpretação feita sobre esses dados, como, por exemplo, o acionamento de um atuador. O nó coordenador não necessita estar conectado diretamente ao computador, essa conexão pode ser feita através de um *gateway* de internet por

exemplo. Em geral, os dados recebidos pelo sistema são armazenados em bancos de dados com o auxílio de um Sistema Gerenciador de Banco de Dados (SGBD). Adicionalmente, o software pode oferecer ao usuário final a funcionalidade de acesso ao sistema por meio da Internet, o que demanda o uso de um servidor de internet. Na Figura D.2 é apresentada uma visão geral da arquitetura e organização de uma RSSF típica.

Figura D.2: Arquitetura e organização de uma RSSF.



Fonte: Adaptado de [LOUREIRO 2006]

## Padrão ZigBee/IEEE 802.15.4

Apesar da grande quantidade de padrões existentes, no ano de 1999 foi identificado um nicho de mercado ainda não explorado e que motivou a criação do padrão ZigBee. A maioria das tecnologias existentes até então ofereciam altas taxas de transmissão para um número relativamente pequeno de dispositivos e com um alto consumo de energia. Até então não proporcionava-se uma infraestrutura de rede que apresentasse as seguintes características:

- Formação autônoma de redes com grandes quantidades de dispositivos em uma grande área de cobertura, em que os dispositivos pudessem se comunicar de forma confiável e segura por anos, sem a intervenção de um operador;
- Baixo consumo de energia associado a um reduzido custo de infraestrutura, complexidade e tamanho;
- Taxa de transmissão de dados relativamente baixa;

- Um protocolo padronizado e aberto que permitisse a interoperabilidade entre produtos de diferentes fabricantes para um mercado global.

Assim, em 2002 surgiu a ZigBee Alliance que engloba mais de 225 empresas (GISLASON, 2008). O padrão ZigBee pode ser encontrado em uma variedade de aplicações em diversos setores da sociedade. A pesquisa envolvendo RSSF tem avançado de forma significativa nos últimos anos. No trabalho proposto por (YICK; MUKHERJEE; GHOSAL, 2008) é apresentado um estado da arte onde é possível observar o rápido crescimento desta área de pesquisa em relação a um estudo semelhante realizado por AKYLDIZ et al. (2002) seis anos antes. Isso se deve, principalmente, à popularização do padrão ZigBee. Na área industrial, (SUNG; HSU, 2011) demonstraram a viabilidade de uso do padrão ZigBee num ambiente industrial, visando o monitoramento de grandezas em tempo real e controle remoto de equipamentos que oferecem risco à saúde do operador.

Um dos diferenciais do ZigBee é camada de rede, que é responsável por garantir transmissões de múltiplos saltos, ou seja, habilita a funcionalidade de formação de redes em malha (Mesh Networking). Esta característica inclui transmissões em broadcast, determinação de rotas de pacotes unicast, bem como a verificação da entrega confiável destes pacotes. Dessa forma, uma rede ZigBee pode se organizar em diversas topologias de rede, como ilustra a Figura D.3. A camada de rede também oferece serviços de segurança, incluindo a entrada e saída segura de nós em redes e a criptografia de dados.

Figura D.3: Topologia em malha *multihop* do protocolo ZigBee.



Fonte: Adaptado de (SUNG; HSU, 2011)

A camada de aplicação e suas subcamadas, são responsáveis por filtrar pacotes destinados a nós não registrados na rede, fornecer confirmação de recebimento



confiável fim-a-fim, manter tabelas de endereçamento, conexão e grupos locais, bem como realizar tentativas automáticas de retransmissão quando não há confirmação de entrega bem sucedida de um pacote. Também são armazenados nesta camada o estado corrente do nó e suas características de segurança e agrupamento.

## Módulo XBee

Dentre os vários dispositivos de hardware baseados no protocolo ZigBee, um modelo bastante conhecido é o XBee, atualmente fabricado pela líder de mercado Digi International, que adquiriu a MaxStream, antiga fabricante deste dispositivo. Os módulos XBee são compostos, basicamente, por um microcontrolador e um transceptor. O microcontrolador contém o firmware com a implementação do protocolo ZigBee e a especificação do comportamento do dispositivo (Coordenador, Roteador ou Dispositivo Final). Cada dispositivo possui dois endereços, o MY (16 bits) e o Número Serial (64 bits). O MY é o endereço de rede, variável, e é distribuído automaticamente pelo coordenador assim que o nó entra na rede. Uma analogia interessante é associar o endereço MY com o endereço IP nas redes TCP/IP com DHCP, em que cada máquina recebe um endereço automaticamente. Já o Número Serial é único e invariável para cada dispositivo fabricado (semelhante ao endereço MAC das placas de rede Ethernet). Os módulos XBee são fabricados em diversas versões, que variam de acordo com o modelo da antena, encapsulamento, frequência de operação e protocolo utilizado. Há uma grande variedade de opções de módulos XBee disponíveis no mercado, portanto, é interessante considerar alguns aspectos antes da escolha de um modelo:

- (a) Frequência de operação e Taxa de Transmissão;
- (b) Alcance x Antena;
- (c) Potência de transmissão x Consumo Energético;
- (d) Custo; e
- (e) Complexidade do projeto.

## E Apêndice: Plano do TCC

### Introdução e Justificativa

Um DC pode ser definido como uma instalação física especializada em abrigar sistemas computacionais. Em uma camada maior de confiabilidade, possuem recursos redundantes de *backup*, energia e comunicação, com sistema de controles ambientais e dispositivos de segurança específicos. Recentemente, o impacto mundial do consumo energético em DC tem sido fonte de diversas pesquisas, sendo responsável por aproximadamente 2% do consumo energético mundial (BHAGWAT et al., 2012). Especificamente em DC, o sistema de refrigeração da sala de servidores totaliza de 25% a 40% do consumo total (RODRIGUEZ et al., 2011; DAVID; SCHMIDT, 2014; RUBENSTEIN; FAIST, 2014). Dentre os custos operacionais de um DC, os gastos relacionados a energia elétrica possuem impacto considerável, contribuindo com aproximadamente 50% das despesas (COMERFORD, 2015). Um dos desafios encontrados por gestores de TI é reduzir os custos e aumentar a eficiência dos seus serviços com o mínimo investimento, devendo identificar problemas de desempenho e implementar as soluções necessárias.

O acesso Micro e pequenas empresas abrigar e gerenciar seus próprios ativos de TI. Dado o crescente volume de informações em formato digital, busca-se manter essas informações em um local próximo e confiável. Algumas empresas optam por adquirir ou atualizar seus próprios servidores e equipamentos de telecomunicação como forma de aumentar o desempenho e confiabilidade dos seus serviços dependentes de TI. Ao tomar esta decisão, devem ser levadas boas práticas em consideração durante o planejamento, implantação e operação, de forma que as operações de dados possam ser seguras e manter-se em alta disponibilidade (MOGAMI; RODRIGUES, 2014). Porém, a realidade para as empresas de categorias menores é a de empregar computadores do tipo *desktops* ao invés de servidores, em condições inadequadas de operação. Contudo, quando começam adquirir servidores de *rack*, a sala não possui controle climático e estes equipamentos necessitam operar em condições adequadas

de temperatura e umidade. O efeito da sobrecarga de temperatura em processadores e memória RAM podem diminuir consideravelmente a sua vida útil ou até mesmo gerar resultados operacionais indesejados (ZHANG et al., 2015; LIM; LIM; KANG, 2015). Outro problema é a umidade, que em conjunto com partículas de poeira no ar podem causar corrosão dos circuitos elétricos dos equipamentos de TI através da higroscopia.

Existem normas que estabelecem critérios para operação adequada dos equipamentos de TI. As normas e protocolos que definem as boas práticas de projeto e implantação de um DC, normalmente são estabelecidas por associações técnicas industriais (DAI et al., 2014), sendo normalmente formuladas pelos fabricantes de equipamentos de DC. Dentre as normas existentes, destaca-se a ANSI/TIA-942-A, por ser amplamente utilizada em todo o mundo (YE; SONG; SUN, 2014). A norma TIA-942 possui o objetivo de fornecer diretrizes para padronizar as fases de desenvolvimento e implantação de um DC. Dentre seus principais aspectos abordados por esta norma, o foco deste trabalho está nas considerações ambientais. Neste sentido, esta norma indica a necessidade de um controle climático para o DC, de forma que opere dentro dos limites estabelecidos e ofereçam condições adequadas de operação dos equipamentos que podem variar de *desktops* até servidores *blade*.

A sala dos servidores é um ambiente que deve ser rigidamente controlado. Considerando a disponibilidade (24/7) de um DC, é importante que o monitoramento dos subsistemas seja ininterrupto, e que ações preditivas possam ser tomadas sem a interferência humana. A Tabela E.1 relaciona os requisitos da norma (TIA-942, 2005) quanto às considerações ambientais, indicando que o ambiente deve ser mantido dentro das faixas de valores de temperatura e umidade.

Estão disponíveis no mercado sistemas de monitoramento para uso específico em DC, porém sua grande maioria é proprietária (NETO, 2013a; PULTZ et al., 2014) e tendem a criar o aprisionamento tecnológico (*vendor lockin*). Em alguns casos, estes sistemas proprietários são invasivos, *i.e.*, exigem a alteração da estrutura de sistemas legados pré-existentes para incorporá-los, pois possuem restrições quanto à modificação do produto. A personalização de um sistema proprietário de acordo com as necessidades do cliente torna-se um problema quando se faz necessário incluir novas funcionalidades, como por exemplo, adicionar um medidor de desempenho personalizado. Uma solução para isto é utilizar-se de sistemas de código aberto.

Tabela E.1: Requisitos do sistema de refrigeração de DC.

Requisitos	Valores		Normal	Unidades
	Mínimo	Máximo		
Temperatura bulbo seco (TBS)	20	25	22	°C
Faixa de variação máxima da TBS	0	5	-	°C / hora
Ponto de orvalho máximo	0	21	-	°C
Umidade relativa	40	55	45	%

Fonte: Adaptados de (TIA-942, 2005).

A adoção de ferramentas livres, como software de código fonte aberto e hardware de projeto arquitetônico aberto, é uma prática crescente entre empresas que querem evitar o aprisionamento tecnológico. Especificamente para DCs, ferramentas de hardware e software *open source* são usadas para monitorar tanto as condições ambientais quanto o consumo energético do sistema de refrigeração (LIAPERDOS et al., 2010; RODRIGUEZ et al., 2011). Dentre os benefícios de utilizar estas ferramentas, destaca-se a independência tecnológica, segurança da informação, personalização, custo reduzido de implantação e interoperabilidade (JOKONYA, 2015; CONGDON, 2015), dentre outros.

Com a popularização do uso de ferramentas desenvolvidas sob licenças livres, é possível encontrar conceitos de um produto comercial em uma solução *open source*, seja esta solução em software ou hardware, resolvendo os mesmos problemas que uma solução proprietária se propõe a resolver. Uma das formas encontradas por gerentes de TI que desejam investir pouco em uma solução de monitoramento é elaborando o seu próprio sistema, habitualmente recorrendo às documentações abertas, na tentativa de encontrar projetos que sejam adequados à aplicação desejada. Especificamente em DC, estas ferramentas possibilitam automatizar o sistema de refrigeração e coletar informações necessárias ao cálculo das métricas verdes, ao mesmo tempo em que se obtém um sistema customizável e de baixo custo.

O emprego das métricas verdes para DC é uma das formas de definir indicadores de desempenho (WANG; KHAN, 2011; VOLK et al., 2013; DAI et al., 2014) e possibilitam fornecer informações mais precisas aos gestores de TI sobre os proces-

sos que regem um determinado serviço. Estas métricas podem ser classificadas em dois níveis: equipamento e instalação (BIANZINO; RAJU; ROSSI, 2011). Na classificação de equipamento, é analisado o consumo de energia por recursos do equipamento, apresentando os resultados em taxas (*e.g.*, eficiência energética). Na classificação de toda a instalação, são analisadas as taxas de um sistema consolidado (*e.g.*, Data Center), composto por diversos equipamentos. A Tabela E.2 resume as três principais métricas encontradas na literatura, utilizadas para medir a eficiência energética em sistemas complexos, que envolvem redes de computadores e telecomunicações.

Tabela E.2: Métricas verdes a nível de instalação.

Nome	Métrica	Cálculo	Unidades	Observação
Power Usage Effectiveness	PUE	$= \frac{\text{Potência Total de Acesso}}{\text{Potência Equipe TI}}$	Proporção	Varia de 1 ao $\infty$
Data Center Infrastructure Efficiency	DCiE	$= \frac{1}{PUE} = \frac{\text{Potência Total de Acesso}}{\text{Potência Equipe TI}} * 100\%$	Porcentagem	Varia de 0 à 100%
Data Center Productivity	DCP	$= \frac{\text{Trabalho Útil}}{\text{Potência Total de Acesso}}$	Proporção	Varia de 1 ao $\infty$

Fonte:

Adaptado de (WANG et al., 2012).

## Objetivos

O objetivo geral do sistema proposto é manter os parâmetros ambientais da sala de servidores dentro dos valores operacionais estabelecidos por normas específicas para DC, visando maximizar a eficiência energética e aumentar a vida útil dos equipamentos de TI.

Objetivos Específicos (TCC-I):

- Obter conhecimento teórico através da revisão bibliográfica dos conceitos relacionados à DC, métricas verdes e sistemas de controle;
- Utilizar o rigor científico para elaborar uma solução para o problema levantado;

- Implementar e conhecer os componentes de hardware e software que farão parte do sistema GreenHop; e
- Obter conhecimento com a utilização de protocolos de RSSF.

#### Objetivos Específicos (TCC-II):

- Executar o sistema proposto em um ambiente de estudo de caso;
- Fornecer recursos para gerenciamento dinâmico das condições ambientais;
- Racionalizar a eficiência energética da sala de servidores;
- Aumentar a vida útil dos equipamentos de TI;
- Analisar os dados coletados; e
- Publicar artigo em eventos da área.

## Metodologia

As metodologias utilizadas para a escrita do TCC são: pesquisa referenciada (TCC-I) e pesquisa aplicada (TCC-II).

O principal método de desenvolvimento adotado para a elaboração da parte prática (TCC-II) será o modelo de ciclo de vida iterativo, com testes de integração realizados em todas as etapas de desenvolvimento do sistema proposto. Estima-se que seja utilizado o método de modularização para o desenvolvimento do hardware, possibilitando ao sistema ser dividido por módulos destacáveis. Esta abordagem permitirá benefícios, como por exemplo: personalização, fácil substituição de peças e reutilização dos componentes. As etapas do projeto estão enumeradas da seguinte forma:

1. Levantamento bibliográfico;
2. Levantamento de sistemas similares já existentes;
3. Análise dos componentes de hardware e software para o sistema;
4. Montagem e testes de mesa dos sensores, atuadores e RSSF;
5. Início da coleta de dados;

6. Adição de sensores de segurança;
7. Adição das funcionalidades de acesso remoto e PUE em tempo real;
8. Realizar análises sobre os dados coletados;
9. Escrever sobre os resultados das análises; e
10. Publicar artigo científico em evento.

## Cronograma proposto

Tabela E.3: Cronograma TCC-I e TCC-II

Etapas	2015					2016						
	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul
1	■	■										
2		■	■	■								
3				■								
4				■	■							
5					■	■	■	■	■	■		
6						■	■	■	■			
7							■	■	■	■		
8									■	■	■	
9										■	■	■
10											■	■

Fonte: O próprio autor.

## Linha e Grupo de Pesquisa

O presente Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) faz parte da linha de pesquisa de redes de computadores do grupo de pesquisa Grupo de Redes e Aplicações Distribuídas (GRADIS). Dentro das linhas de pesquisa que o grupo atua, este trabalho está relacionado com conceitos de avaliação de desempenho e com gerência de infraestrutura.

## Forma de Acompanhamento/Orientação

O desenvolvimento do trabalho será acompanhado pelo professor orientador de forma a manter o aluno dentro do prazo estipulado. As reuniões entre aluno e professor

ocorrerão em períodos semanais, por um período de aproximadamente uma hora. O professor analisará o andamento dos trabalhos e verificará se estes estão de acordo com o previsto. Além disso, serão realizadas correções usando recursos à distância, como compartilhamento de arquivos, correio eletrônico, etc.

O orientador poderá utilizar um controle de acompanhamento das atividades a serem realizadas pelo aluno. As tarefas estabelecidas deverão ser cumpridas a cada encontro. O não cumprimento das atividades dará ao orientador o direito de abdicar da orientação.