

# GreenHop: Open source PUE continuous monitoring for small and medium data centers

Daniel Scheidemantel Camargo

Universidade do Estado de Santa Catarina (UDESC)  
Departamento de Ciência da Computação (DCC)  
e-mail: daniel@colmeia.udesc.br

Charles Christian Miers

Universidade do Estado de Santa Catarina (UDESC)  
Departamento de Ciência da Computação (DCC)  
e-mail: charles@colmeia.udesc.br

**Resumo**—This paper presents the GreenHop solution, focused on energy and environmental monitoring in small and medium size Data Centers (DCs). The solution enables the DC administrator to monitor the DC PUE (Power Usage Effectiveness) and maintain the environmental parameters in compliance with standards and good practice guidances. The solution is applied in a case study, showing the consumption of the cooling equipment when setting the DC operating temperature on 18°C, 23°C, 25°C, and free cooling. Thus, we identified an improvement on PUE and reduction of power consumption as a result of the adoption GreenHop monitoring solution.

## I. INTRODUÇÃO

A quantidade de dados produzidos pela humanidade dobra a cada dois anos, segundo dados da *International Data Corporation* (IDC) [1]. Esta demanda traz crescentes desafios para as organizações que possuem ou dependem de serviços providos por *Data Centers* (DCs) [2]. Um destes desafios está relacionado ao uso de energia elétrica em sua infraestrutura, normalmente privada, restringindo indiretamente a sua expansão [3]. Mesmo buscando eficiência energética com a consolidação de servidores [4] e a adoção de componentes de hardware mais eficientes, os DCs continuam a crescer em quantidade e tamanho [5] 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) [6].

Estima-se que em 2011, aproximadamente 2% do consumo energético mundial tenha sido proveniente de DCs [7] e com uma projeção de 53% de aumento até 2020, segundo relatório da *Natural Resources Defense Council* (NRDC) [8]. Enquanto grande parte da atenção pública está equivocadamente concentrada no impacto ambiental dos DCs de porte industrial (e.g., Google, Facebook e Apple), a maior parte da energia é de fato consumida por DCs de pequenas e médias empresas [2], [8], [9]. O desconhecimento das boas práticas de planejamento e operação de DCs fazem que os gestores de TI adotem ações excessivamente cautelosas mas que geram alto impacto no consumo energético. Um exemplo disso, é configurar o equipamento de refrigeração na temperatura mínima para suprir uma demanda de calor desconhecida. Entretanto, normas técnicas são consideradas referência para definição de uma série de boas práticas que visam o funcionamento adequado dos equipamentos de TI, minimizando os custos com energia elétrica.

Um estudo realizado em 2012 [3], aplicado em mais de 5000 DCs de médio a grande porte, mostra a proporção de

consumo dos principais subsistemas de um DC, com área física de até 464 m<sup>2</sup>. A Figura 1 apresenta os resultados desta pesquisa.

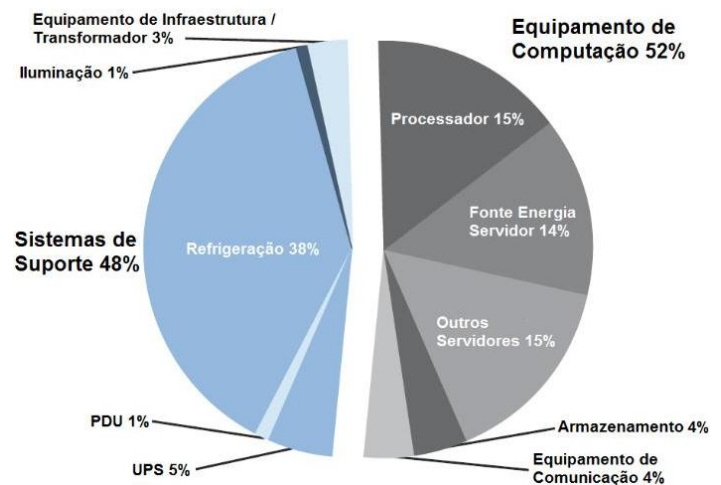


Figura 1. Demanda de energia elétrica em DCs. Adaptado de [3].

Analisando a Figura 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 [7], [10]. 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.

De forma geral, entre os custos operacionais de um DC, os gastos relacionados com energia elétrica possuem impacto considerável, contribuindo com aproximadamente 50% das despesas [11]. A adoção de métricas específicas para DC (e.g., *Power Usage Effectiveness* (PUE) e *Data Center Infrastructure Efficiency* (DCiE)), permitem condensar em apenas um valor a relação entre os diversos subsistemas de um DC, afim de identificar quais os tipos de recursos possuem maior influência nesse valor. Para aplicar as métricas é indicado um sistema de monitoramento que permita medir o consumo de energia [12], [13] de forma granular. Como opção às ferramentas proprietárias de monitoramento típicas de DCs, as plataformas de código aberto (*software* e *hardware*) possibilitam desenvolver uma solução para monitorar os parâmetros ambientais e energéticos da sala de servidores, com baixo custo de aquisição e implementação.

O presente trabalho mostra a aplicação da solução Green-Hop, desenvolvida pelos autores, em um estudo de caso real. A solução tem como objetivo fornecer métricas de eficiência energética para análise em tempo de execução de forma precisa e granular. Essa abordagem possibilita adotar políticas de eficiência energética para redução do consumo de energia de DCs, ao mesmo tempo em que mantém os equipamentos operando dentro dos padrões ambientais estabelecidos por normas de DC. O presente trabalho evidencia que as oportunidades de ganhos de eficiência podem ser discutidas sob a ótica da eficiência energética, resultando na estimativa de reduções substanciais no consumo de energia elétrica e, consequentemente, em economia financeira significativa. A contribuição deste trabalho é o desenvolvimento de uma solução *open source*, permitindo que todo o projeto possa ser livremente utilizado, estudado, distribuído e modificado. Adicionalmente, na Seção IV, também são apresentados os dados coletados em um estudo de caso real, aplicado em um DC classificado como Sala de Servidores, que é um dos mais comuns e tipicamente com maior consumo de energia. Estes dados são relevantes no sentido de mostrar uma situação inicial não monitorada e compará-la com três possíveis situações posteriores, com a aplicação de uma política de eficiência energética. Embora existam abordagens que já façam algum tipo de monitoramento em sala de servidores [14]–[16], não são abordados os aspectos energéticos e climáticos em apenas uma solução.

## II. DATA CENTERS

A literatura provê diversas definições para o termo “*Data Center*”, que variam de acordo com sua aplicação [17]–[19]. Entretanto, com o objetivo de abranger DCs heterogêneos, define-se de modo generalizado como uma instalação especializada em abrigar sistemas computacionais e componentes associados [20]. Sua aplicação varia de um DC privado à uma organização, servindo como suporte para sua atividade-fim, até uma organização compreendida por ter como principal atividade a comercialização de serviços de TI para terceiros, servindo como provedor de nuvem pública, *colocation* e hospedagem [21].

Usualmente, a infraestrutura de um DC dispõe de sistemas de suporte, tais como equipamentos de refrigeração, distribuição de energia (*power distribution unit* (PDU)) e transformadores, permitindo que os sistemas computacionais funcionem de forma adequada. Em uma camada de maior confiabilidade, podem ter recursos redundantes de *backup*, sistemas de energia ininterrupta (*uninterruptible power supply* (UPS)) e de equipamentos de rede. Adicionalmente, o DC deve dispor de um sistema de monitoramento ambiental e de segurança física, específicos para esse tipo de instalação. Um DC típico pode ser organizado em um ou mais sub-espacos [22], sendo o ambiente da sala de servidores o local que abriga os equipamentos computacionais e que necessita operar em condições ambientais controladas.

### A. Classificação de Data Centers

Existem diferentes classificações de DC na literatura [23]–[25]. A classificação por porte do DC [23] (Tabela I) auxilia a compreensão das diferentes proporções que um DC pode ter, definindo cinco categorias de acordo com a quantidade média de servidores.

Tabela I. CLASSIFICAÇÃO DE DC POR PORTE. ADAPTADO DE [26].

| Categoria             | Nº de Servidores    | Média de Servidores |
|-----------------------|---------------------|---------------------|
| DC Empresarial        | Centenas a Milhares | 515                 |
| DC Médio              | Centenas            | 192                 |
| DC Local              | Dezenas a Centenas  | 32                  |
| Sala de Servidores    | Unidades a Dezenas  | 3                   |
| Armário de Servidores | 1 a 2               | 2                   |

A classificação proposta na Tabela I é baseada na pesquisa de [23], aplicada a mais de 154 mil organizações nos Estados Unidos que abrigam suas próprias infraestruturas de TI. Nesta pesquisa 3,1% das organizações foram categorizadas como DC Empresarial, Médio e Local, abrigando 59% de todos os servidores, enquanto 96,9% das organizações, pertenciam às demais categorias, contabilizaram 41% do total de servidores. De forma geral, estas organizações são constituídas por hospitais, universidades, redes de varejo, supermercados e prestadores de serviços, *i.e.*, estabelecimentos que não possuem *expertise* para o gerenciamento de espaço, energia elétrica e condições ambientais de seus ambientes de TI. Segundo [27] *apud* [8], a quantidade de energia elétrica consumida por DCs de instituições de pequeno e médio porte, causam o maior impacto no consumo energético. Com isso, é possível inferir que as ações para reduzir o consumo de energia podem ser focadas neste perfil de organização. De forma geral, os DCs de categoria menor normalmente não dispõem de uma infraestrutura adequada para garantir a mesma eficiência energética quando comparado às categorias de porte maior.

No Brasil esta realidade não é diferente, segundo uma pesquisa da 28, realizada em 2015 com quatrocentas empresas em cinco estados brasileiros, mostrou que 75% destes estabelecimentos abrigavam seus próprios servidores e demais equipamentos de TI. Mesmo com a tendência da computação em nuvem seja uma tendência para empresas de pequeno porte [29], muitas ainda mantêm os seus próprios servidores em suas infraestruturas locais visando a segurança dos dados. Isto é: micro e pequenas empresas (MPE) ainda optam por adquirir e gerenciar os seus próprios servidores e equipamentos de TI, ou atualizá-los, como forma de aumentar o desempenho e confiabilidade dos seus serviços que dependem de TI. Contudo, a realidade para a maior parte das pequenas e médias empresas, é de empregar servidores legados em pequenos espaços inadequados de operação [2], [8], [9]. Um exemplo comum, é utilizar sistemas de refrigeração tipo *split*, superdimensionados e configurados na temperatura mínima (18°C), para tentar eliminar o calor dos servidores alocados em espaços limitados, que por si só restringem a possibilidade de organização em corredores quente e frio [30], resultando em um grande desperdício de energia. Para evitar que problemas como este ocorram, existem normas técnicas que estabelecem critérios para operação adequada dos equipamentos de TI em um ambiente de DC, podendo resultar na redução do consumo de energia e no aumento da vida útil dos equipamentos.

### B. Normas técnicas para Data Centers

Um DC heterogêneo normalmente hospeda equipamentos de diferentes fabricantes, sendo impraticável atender a cada uma das especificações. Contudo, as normas técnicas estabelecem um guia de boas práticas durante todas as fases de planeja-

mento, desenvolvimento e operação de um DC, fundamentadas em confiabilidade, eficiência e desempenho [31]. São normalmente estabelecidas por associações técnicas [12], constituídas por diversos fabricantes de equipamentos de DC e especialistas de instituições de pesquisa. São exemplos de normas, as definidas pela ASHRAE, CENELEC-50600, ANSI/BICSI-002, ANSI/TIA-569C e a ANSI/TIA-942-A, sendo que a última destaca-se por ser amplamente utilizada [31].

A norma *Telecommunications Industry Association (TIA)-942-A* é organizada em quatro principais aspectos [22], sendo que são utilizados neste trabalho apenas as considerações ambientais. A Tabela II relaciona os requisitos estabelecidos pela norma TIA-942-A [22] quanto às considerações ambientais, sendo recomendado que o ambiente seja mantido dentro das faixas de valores de temperatura e umidade.

Tabela II. REQUISITOS DO SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO DE DC. [22].

| 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     | %         |

O controle ambiental de um DC deve ser mantido sob rigoroso controle, necessários para manter dentro das faixas especificadas [32]. Todavia, manter este rigor exige um consumo contínuo de energia, que para os sistemas de refrigeração pode ter um impacto de 40% nos gastos de energia elétrica. A redução do consumo de energia neste tipo de equipamento é uma das opções que podem ser adotadas por políticas que especificam como pode ser feita esta redução.

### C. Políticas de eficiência energética para Data Centers

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. Seu grau de especificidade varia de acordo com as características da organização, desde a atividade-fim desenvolvida até os tipos de equipamentos existentes, e, ainda, em razão de situações externas, como a localização geográfica da organização e a época do ano. Deve-se analisar a necessidade e a viabilidade de implementação das práticas propostas.

Especificamente para DCs, existem diversas políticas que podem ser adotadas, como por exemplo as estabelecidas no documento "Data Center Master List of Energy Efficiency Actions" [30], atualizada periodicamente pelo *Center of Expertise for Energy Efficiency in Data Centers (CoE)* e patrocinada pelo Departamento de Energia dos Estados Unidos (USDE). Deste documento foram selecionadas duas ações consideradas como um nível fácil de serem colocadas em prática. Na primeira ação, a eficiência energética pode ser obtida mantendo a TBS próxima ao limite superior estabelecido pelo gestor, de forma a reduzir o uso do equipamento de ar condicionado. Em regiões geográficas favorecidas por um clima de temperatura média anual abaixo do limite da TBS, possibilita aplicar uma segunda ação, referente a técnica do *free cooling*, que permite o resfriamento gratuito, possibilitando eliminar ou reduzir significativamente os custos com a climatização. Em DCs, o exemplo mais comum da aplicação prática do

*free cooling* é utilizar o ar exterior mais fresco que o ar interior, através de exaustores, poupando-se energia de um modo significativo. Todavia, para se certificar que a técnica é satisfatória, faz-se importante contar com uma solução de monitoramento ambiental, que permita avaliar se os parâmetros de temperatura, umidade, ponto de orvalho estão dentro das faixas especificadas pelas normas.

Uma das formas de avaliar o impacto adoção de determinadas políticas de eficiência energética para o DC como um todo, é através da utilização de métricas que condensam o comportamento dos subsistemas em apenas um valor. Isto permite uma interpretação simplificada, facilitando sua compreensão tanto a nível operacional, quanto a nível de negócios.

### D. Métricas para Data Centers

Quando se faz necessário conhecer o impacto energético da adoção de determinadas políticas de eficiência energética para DC, as métricas podem ser idealmente utilizadas como uma ferramenta de avaliação [33] de tomada de decisão. Seu uso permite correlacionar diferentes informações, como o consumo de energia dos sistemas computacionais e de suporte, ou ainda considerar a taxa de tráfego da rede com o consumo total do DC [34]. O uso comum destas métricas é na aferição da eficiência de uma determinada ação, comparando-se os indicadores antes e depois de adotar determinadas políticas de redução de consumo de energia. Também é comum a comparação dos valores destas métricas entre DCs de empresas diferentes, apenas é indicado que seja feito entre sites de mesmo porte, aplicação e região geográfica [35]. Quando os valores obtidos são positivos, algumas organizações anunciam publicamente, indicando sua responsabilidade ambiental e agregando valor aos serviços.

Segundo taxonomia realizada [36], existem diferentes métricas que podem ser adotadas em DCs. Todavia, podem ser divididas de acordo com sua especificidade, estando a nível de equipamento ou a nível de toda a instalação. Visando abranger a maior variedade possível de equipamentos, as métricas a nível de instalação adotadas no presente trabalho, são as comumente adotadas devido a possibilidade de serem utilizadas em diversos tipo de equipamentos em DCs heterogêneos. A nível de instalação, destacam-se as métricas definidas pela associação *The Green Grid (TGG)*, denominadas PUE (Equação 1) e DCiE (Equação 2), devido sua grande aceitação na academia e na indústria [19], [20] e por serem de fácil entendimento e medição.

$$PUE = \frac{P_{total}}{P_{TI}} \quad DCiE = \frac{P_{TI}}{P_{total}} * 100\% = \frac{1}{PUE} * 100\% \quad (1) \quad (2)$$

Na Equação 1, a variável  $P_{total}$  é a potência total de acesso, *i.e.*, a soma de toda a energia consumida pelo DC, considerando os equipamentos de TI e de suporte (*e.g.*, refrigeração, iluminação, UPS e estações de trabalho da equipe de suporte). A variável  $P_{TI}$  é a potência consumida exclusivamente por equipamentos de TI, constituída pela soma do consumo dos servidores, armazenamento, *switches* e roteadores. Os valores do PUE variam de 1.0 ao infinito, sendo que quanto mais próximo de 1, mais eficiente é o DC. Por exemplo, um PUE=1.0 representaria um DC ideal, pois toda a energia de acesso está voltada apenas para equipamentos de TI (não há

consumo de energia para refrigeração, iluminação e conversores), já um PUE=1.8 significa que para cada 1kW consumido por equipamentos de TI é necessário 0.8kW de consumo dos equipamentos de suporte. A Equação 2, que representa a métrica DCiE, sendo uma recíproca do PUE que transforma seu valor em uma taxa que varia de 0% a 100% e quanto maior este valor, mais eficiente é o DC. Existem outras métricas que fornecem índices para eficiência energética [34], [36], mas que não são o foco deste trabalho.

Diversas abordagens tentam definir um valor ideal para o PUE [37]–[39], mas como devem ser consideradas as diferenças de porte e localização do DC, é inviável estabelecer um valor ótimo. Utilizando como referência a TGG que definiu esta métrica [40], foi estimado em 2008 que a realidade encontrada nas organizações para os próximos três anos era um PUE de 1,7 para as categorias de Armário e Sala de Servidores, 1,5 para o porte de DC Local e 1,4 para DC de categoria Empresarial. Porém, segundo o relatório emitido em 2013 pelo Instituto Uptime [41], verificou que em 2007 o valor médio do PUE era de 2,5, em 2011 de 1,89 e somente em 2013 reduziu para 1,65. As grandes indústrias de DCs como Google, Facebook e Apple possuem o PUE abaixo de 1,2.

Um desafio encontrado para o estabelecimento destas métricas está relacionado com a aquisição das informações de consumo de energia através de sensores. São encontradas diferentes abordagens para obter os valores das variáveis do PUE, sendo comum fazer apenas medições periódicas do consumo de energia (e.g., duas vezes ao dia) e em apenas alguns equipamentos de maior consumo [16]. Todavia, estes métodos reduzem a fidelidade dos índices do PUE, sendo normalmente considerado o valor aproximado e raramente o valor exato. Para alcançar uma maior precisão, se faz necessário utilizar um sistema de monitoramento que permita obter o valor do consumo energético e do PUE em tempo real (poucos segundos) e com um ótimo nível de granularidade (detalhamento) para permitir a aferição e melhoria contínua.

O ambiente de um DC é dinâmico e as demandas exigem um nível complexo de gerenciamento [42]. Para possibilitar o gerenciamento, faz-se necessário conhecer o comportamento dos parâmetros ambientais e energéticos. Estão disponíveis no mercado, sistemas de monitoramento para uso específico em DC, porém sua grande maioria é proprietária [43], [44] e em alguns casos invasiva, i.e., exigem alguma alteração da estrutura pré-existente para incorporá-los à sistemas legados.

#### E. Soluções correlatas de monitoramento para DC

Os sistemas de monitoramento para DCs são tipicamente proprietários e normalmente fazem parte de uma plataforma dedicada ao gerenciamento completo da infraestrutura de um DC, denominada *Data Center Infrastructure Management* (DCIM) [45]. Seus custos elevados de aquisição e implantação inviabilizam o investimento por parte de pequenas e médias empresas neste tipo de solução [41]. Todavia, as soluções específicas para monitoramento ambiental e energético de DC são menos complexas que as plataformas DCIM, utilizando uma abordagem simplificada, mas ainda disponibilizadas sob licenças proprietárias.

Com o objetivo de desenvolver uma solução flexível, destaca-se a adoção de licenças abertas como principal caracte-

terística, possibilitando maior liberdade aos gestores adaptarem a solução às suas necessidades específicas. Foram identificadas cinco soluções correlatas, totalmente *open source*, e voltadas especificamente ao monitoramento dos parâmetros ambientais e energéticos da sala de servidores de um DC. Estas soluções foram classificadas de acordo com requisitos que basicamente constituem um sistema de monitoramento, se utilizam alguma norma de DC para indicar as condições ambientais, bem como o uso da métrica PUE para o fator energético. A Tabela III resume as principais características das soluções encontradas que enquadram-se nestes requisitos.

Tabela III. SOLUÇÕES CORRELATAS DE MONITORAMENTO DE SALA DE SERVIDORES.

| Requisitos    | EnvMon       | [14]    | TOMBOX   | [16]     |
|---------------|--------------|---------|----------|----------|
| Protocolo     | Ethernet     | ZigBee  | Ethernet | Nenhum   |
| Software      | RRDtool      | MatLab  | Zabbix   | Database |
| Processamento | Raspberry Pi | PC      | PC       | PC       |
| Tipo MCU      | Arduino      | Arduino | Arduino  | Nenhum   |
| Normas        | Não          | Não     | Não      | Não      |
| Consumo       | Não          | Não     | Não      | Sim      |
| Métrica PUE   | Não          | Não     | Não      | Sim      |

Nenhuma das soluções identificadas faz a análise de parâmetros ambientais que vão além dos parâmetros de temperatura e umidade, como ponto de orvalho e pressão por exemplo. Apenas um trabalho [16] analisa o consumo de energia elétrica dos equipamentos, porém não possui uma solução automatizada para o monitoramento dos dados e medição do consumo energético, sendo a única que fornece informações sobre a métrica PUE.

Ao considerar algumas características comuns a um sistema de monitoramento, apenas [14] utiliza conceitos de Rede de Sensores Sem Fio (RSSF), TomBox utiliza a ferramenta de software de monitoramento Zabbix, EnvMon usa como processamento e armazenamento um computador Raspberry Pi e [16] analisa o consumo de energia para uso da métrica PUE. Entretanto, nenhuma das soluções encontradas faz uso de todos estes critérios em uma só solução. As tecnologias utilizadas na solução proposta foram selecionadas visando sua implantação em DCs heterogêneos, com porte que podem variar entre Armário de Servidores a DC Local.

### III. SOLUÇÃO DE MONITORAÇÃO PROPOSTA: 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. Paralelamente, possibilita manter os servidores em operação sob rígido controle ambiental, conforme estabelecido pela norma adotada. 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. O GreenHop é constituído exclusivamente por plataformas *open source*, afim de prover benefícios como: independência tecnológica, personalização, expansão, custo reduzido de implantação e interoperabilidade com sistemas legados [46], [47], afim de permitir ao gestor adequar a solução aos requisitos singulares de seu ambiente de DC.

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. Em caso de aumento da potência de refrigeração, para reduzir a temperatura ou mantê-la dentro da faixa especificada, o benefício atingido é a longevidade dos ativos de TI, aumentando os níveis de confiabilidade e disponibilidade do DC, postergando a substituição de equipamentos. De forma geral, a solução GreenHop permite ao gestor avaliar o impacto sobre a adoção de diversas políticas de eficiência energética.

A solução GreenHop é constituída por componentes de hardware que formam uma RSSF para obtenção dos dados dos sensores e componentes de software que permitem a organização destes dados transformando-os em informações possível de ser interpretada, visualizada e monitoradas. A partir de análise previamente realizada, foram selecionados os hardwares: Arduino para os nodos, computador Banana Pi para armazenamento dos dados e o protocolo de comunicação sem fio ZigBee, além dos sensores definidos na Tabela IV. 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 e entre os dados recebidos pela RSSF e o Zabbix.

#### A. Características dos nodos da RSSF

A RSSF da solução GreenHop é basicamente composta por dois tipos de nodos: final e coordenador. Os nodos finais realizam o sensoriamento dos parâmetros físicos desejados, permitindo o uso de até treze sensores distintos por cada nodo. Estes sensores possuem características e protocolos diversos e podem ser utilizados de forma simultânea, pois a programação do Microcontrolador (MCU) do Arduino permite essa heterogeneidade através do uso de bibliotecas. Um rádio coordenador, conectado ao Banana Pi, recebe todas as informações enviadas pelos nodos finais, caracterizando-o como o nodo sorvedouro da rede (Figura 2).

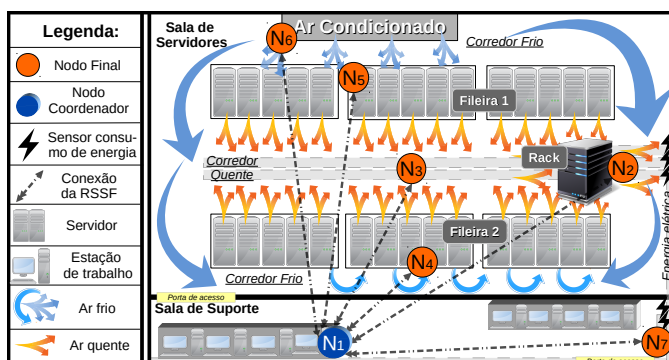


Figura 2. Exemplo para distribuição dos nodos em um ambiente.

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. A flexibilidade dos rádios ZigBee facilita a distribuição dos nodos, de forma que todo o ambiente seja monitorado, pois os nodos mais próximos ao coordenador podem atuar como roteadores dos nodos finais mais distantes (*multi-hop*). Diferentes topologias para a distribuição dos nodos podem ser formadas, sendo a topologia do tipo estrela

comum em ambientes menores que trinta metros quadrados, como é o caso ilustrado na Figura 2. Alguns nodos finais são dispostos de forma a identificar o comportamento ambiental. Um nodo também é posicionado na área externa da sala de servidores, mas interna ao laboratório, para possibilitar estabelecer uma correlação entre as condições externas da sala com as condições internas. Os nodos finais estão configurados para realizar medições a cada três segundos, sendo estes dados enviados ao nodo coordenador logo após a sua medição.

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 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.

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 'tantos' 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 de cada parâmetro. Neste método, o MCU não é 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. Com isso, 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, podendo ser 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.

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 *Simple Network Management Protocol* (SNMP) Trapper ao servidor Zabbix, que é o responsável por organizar, analisar e armazenar todas as informações em sua base de dados. A Figura 3 representa, de forma sucinta, o fluxo dos dados entre nodos finais e nodo coordenador do GreenHop.

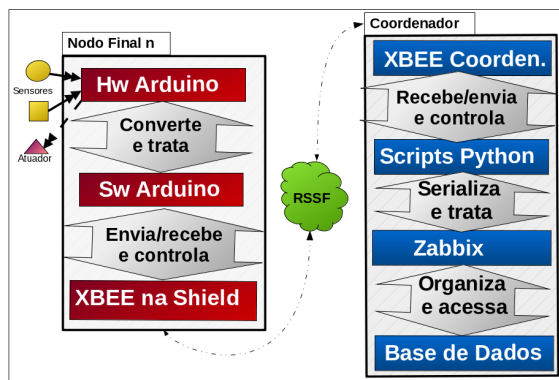


Figura 3. Fluxo dos dados entre Nodos Finais e Nodo Coordenador.

Na Figura 3 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.*, comandos para atuadores. Essa possibilidade foi inicialmente testada com sucesso, apenas sendo exigido uma modificação maior no código principal 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) e que os pacotes enviados sejam compatíveis com o padrão estabelecido pela solução GreenHop. O padrão consiste em um vetor de 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.

### B. 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 [48]: 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 IV. 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 IV lista todos os sensores que são utilizados no estudo de caso (Seção IV). Na coluna de consumo, o valor é considerando durante o modo de operação, a acuidade é a margem de erro e a coluna das faixas determina os valores máximo e mínimo que cada sensor pode realizar as leituras.

Tabela IV. SENSORES DE BAIXO CUSTO UTILIZADOS NO GREENHOP.

| Parâmetros  | Sensores   | Consumo | Acuidade | Faixas   |
|-------------|------------|---------|----------|----------|
| Temperatura | DHT22      | 1,5mA   | 0,5°C    | -40~80°C |
|             | BMP180/185 | 5µA     | 1°C      | 0~65°C   |
| Umidade     | DHT22      | 4,3mA   | 2%       | 0~100%   |
| Consumo     | SCT013-000 | NA      | 3%       | 0~100A   |
| Energético  | ACS 714    | NA      | 1,5%     | ±30A     |

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 IV. 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.

A operação e o tratamento dos dados obtidos pelos sensores é feito localmente no nodo final, através das bibliotecas de cada sensor, sendo enviado para o nodo coordenador apenas informações compreensíveis ao parâmetro analisado. Por exemplo, o dado de temperatura é convertida e enviada em graus Celsius, a umidade em percentagem e o consumo de energia em Watts. Cada um dos sensores listados na Tabela IV podem ser substituídos por outros sensores encontrados no mercado, pois a disponibilidade de mercado pode variar, bastando adicionar novas bibliotecas ao Arduino, se necessário. Salienta-se que para o estudo de caso, no qual foram realizados os testes descritos na Seção V, estes sensores foram considerados satisfatórios para a obtenção dos dados desejados.

#### IV. ESTUDO DE CASO

Foi utilizado o Laboratório de Processamento Paralelo e Distribuído (LabP2D) da Universidade do Estado de Santa Catarina (UDESC) como o ambiente de estudo de caso para o levantamento de requisitos e realização dos testes, descritos na Seção V. O LabP2D oferece recursos humanos e materiais para realização de atividades de pesquisa, ensino e extensão à comunidade acadêmica da UDESC. Possui uma área de trinta metros quadrados, sendo classificado como um DC de porte local de acordo com os critérios da Tabela I.

O LabP2D possui um sistema computacional com os equipamentos de TI: trinta computadores desktops com potência máxima de 10,5kW, um *rack* contendo quatro servidores de *rack* e quatro *switches* gerenciáveis com potencia total de 4,8kW. Salienta-se que durante toda a fase de testes, o laboratório manteve-se com esta mesma configuração. Uma das principais aplicações deste laboratório é prover uma nuvem computacional privada com a solução OpenStack, onde todos os equipamentos de TI estão integrados entre si, inclusive os computadores desktop empregados como servidores de processamento. 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*.

Dentre os sistemas de suporte, destacam-se: um equipamento de ar condicionado *split* de 30kBTUS (equivalente a 2,5 Toneladas de Refrigeração (TR)), que distribui o ar frio pelo método *overhead*, e possui potência máxima de 2,6kW. Adicionalmente, uma bancada com cinco estações de trabalho com monitores para uso operacional, com potência total de 2,25kW e iluminação fluorescente que totaliza 480 Watts de potência. Mesmo caracterizado como um laboratório de pesquisa, o sistema computacional e de suporte são mantidos em funcionamento contínuo, exceto a iluminação que é usada apenas enquanto a sala está ocupada.

Uma das características da solução GreenHop é ser independente da infraestrutura computacional e de rede do laboratório, sendo utilizada apenas a Internet para comunicação externa e energia elétrica para alimentação dos nodos e do computador Banana Pi. Antes da implantação da solução GreenHop, os responsáveis pelo laboratório desconheciam o funcionamento da dinâmica dos parâmetros ambientais com exatidão. Este ambiente era mantido à uma temperatura constante de 18°C, para garantir que os equipamentos não fossem danificados por causa do excesso de calor gerado pelos processadores. Até o momento dos testes, não tinha sido aplicada a técnica do *free cooling* no laboratório, bem como eram desconhecidas as potencialidades da região de Joinville-SC/Brasil para este tipo de técnica.

#### V. 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. A norma TIA-942-A é utilizada como referência para estabelecer a temperatura máxima de operação do equipamento de refrigeração. 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*.

##### A. Organização dos nodos

Foram identificados os pontos estratégicos para a distribuição dos nodos e foram organizados da seguinte forma. O nodo coordenador ( $N_1$ ) está localizado na mesa da equipe de suporte e conectado ao Banana Pi. Dentre os demais nodos finais, destaca-se o nodo ( $N_2$ ) que mensura o consumo de energia dos sistemas computacionais, e está posicionado no PDUs das duas fileiras dos computadores *desktop* e do *rack*. Um nodo ( $N_7$ ) no quadro de energia, mensura o consumo dos sistemas de suporte, compreendido pela iluminação, bancada operacional e ar condicionado. O consumo de energia é feito através de cinco sensores de corrente elétrica do tipo SCT013, alocados em dois nodos finais, sendo três sensores no  $N_2$ , mensurando o consumo dos equipamentos de TI e dois sensores no  $N_7$ , para os sistemas de suporte. Os demais nodos mensuram os parâmetros ambientais e são usados em testes paralelos ao presente trabalho. Considerando o estado-da-arte, o ideal é ter uma maior quantidade de pontos de coleta, maior será a granularidade das informações e maior a qualidade da avaliação. 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 e todos contêm sensores de parâmetros ambientais.

Todos os dados 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.

Os resultados esperados da aplicação dos testes é a possibilidade de avaliar efetividade da aplicação de uma política de eficiência energética. 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 apenas o PUE e o DCiE como referência de comparação entre os testes.

##### B. 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 base para o incremento desse parâmetro dos demais testes. A análise dos parâmetros ambientais é feita durante o período 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, energéticos e de relatório.

### C. 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.

### D. 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.

### E. 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.

### F. Consolidação do plano de testes

Com o objetivo de organizar e sintetizar o plano de testes, a Tabela V 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.

Durante todos os testes é utilizado a mesma organização dos nodos e feita a verificação do consumo de energia nos

Tabela V. 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    | Free Cooling |
| Incremento na temperatura | Base    | 5°C     | 7°C     | –            |
| Temperatura externa       | 22°C    | 24°C    | 25°C    | 17°C         |

sistemas computacionais e de suporte. Utilizar um plano bem definido e executado sob rigor, possibilita obter os resultados corretos de forma que os testes possam ser igualmente equiparados.

## VI. RESULTADOS OBTIDOS & ANÁLISE

Todos os resultados foram obtidos sob análise dos gráficos fornecidos pelo *from-end* do Zabbix, os quais 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, é mostrado uma parte do gráfico do Zabbix, com o objetivo de auxiliar na compreensão dos detalhes do comportamento da métrica PUE. Tendo em vista que o comportamento do equipamento de ar condicionado é cíclico, durante a maior parte do tempo o mesmo comportamento se repete. 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.

Especificamente em relação ao consumo de energia, observa-se que a potência consumida nos Testes 1, 2 e 3, em que 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. Portanto, para diferenciar os resultados, é estabelecido o valor médio de tempo entre os acionamentos do compressor, indicados através do símbolo  $\leftrightarrow$  acrescido do marcador  $\Delta T$ , bem como uma proporção em que o compressor fica ligado e desligado. Essa abordagem foi feita utilizando consultas à base de dados, o que possibilita uma maior precisão no resultado médio final. Os picos de potência no instante inicial da compressão nos Testes 1, 2 e 3 ultrapassam de 5kW, representando um PUE na a média de 6 pontos nesses instantes. Esse comportamento mostra que quanto mais vezes é acionado o compressor, maior será a sua influência no consumo médio de energia.

### A. 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 4-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

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



do PUE. A Figura 4-A mostra a relação das demandas de consumo de energia entre os cinco sensores e a Figura 4-B mostra o gráfico de comportamento do PUE, apresentando o valor médio para o período selecionado de 18 minutos.

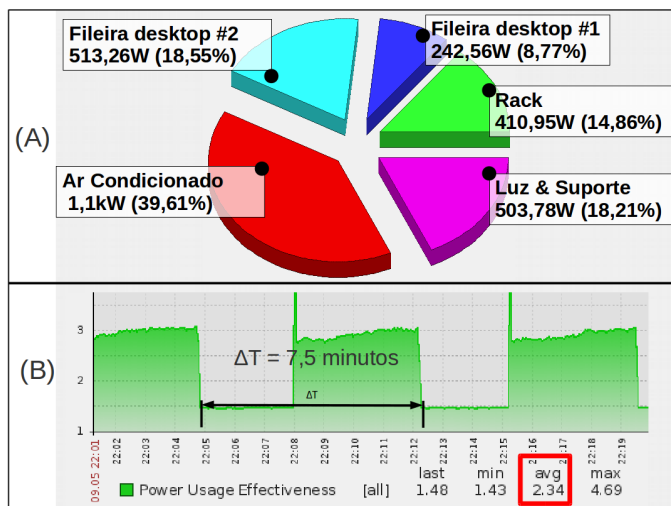


Figura 4. Gráfico das demandas (A) e PUE (B) em 18°C.

#### B. 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.

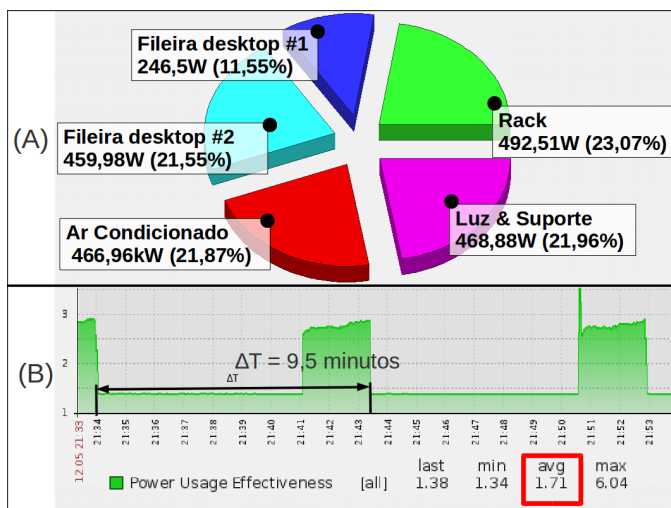


Figura 5. Gráfico das demandas (A) e PUE (B) em 23°C.

De acordo com a Figura 5-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 5-A. A Figura 5-B mostra o gráfico de comportamento do PUE, apresentando o valor médio para o período selecionado de 19 minutos.

#### C. 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.

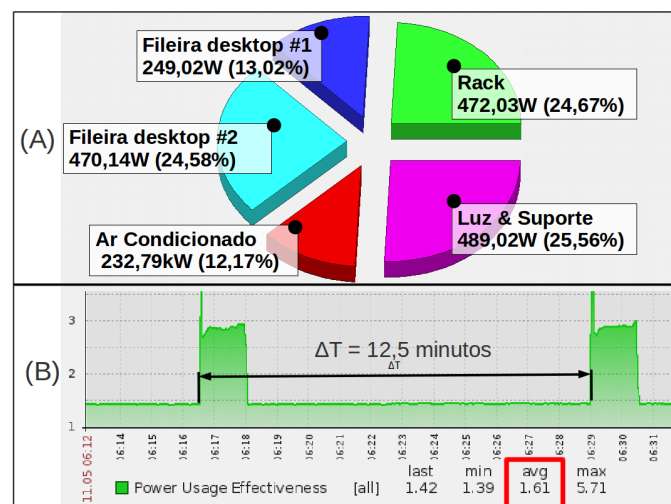


Figura 6. Gráfico das demandas (A) e PUE (B) em 25°C.

De acordo com a Figura 6-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-A. A Figura 6-B mostra o gráfico de comportamento do PUE, apresentando um período selecionado de 19 minutos.

#### D. 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). A temperatura média constatada no período desse teste é de 18°C, aproximadamente. Porém, no caso do *free cooling* não há problema, pois esta temperatura é concedida naturalmente pelo ambiente externo. A relação das demandas de consumo de energia no período é mostrado na Figura 7-A e mostra que não há o consumo

do equipamento do ar condicionado. A Figura 7-B mostra o gráfico de comportamento do PUE, que neste caso não existe os momentos em que o compressor está ligado, apresentando um período selecionado de 17 minutos.

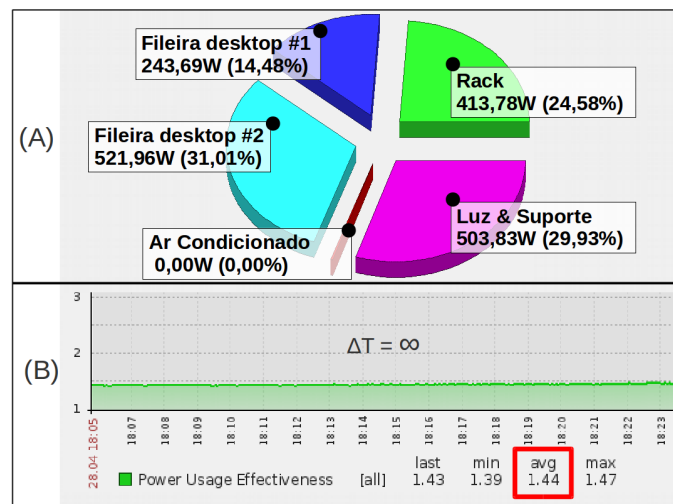


Figura 7. Gráfico das demandas (A) e PUE (B) durante o *free cooling*.

Especificamente em relação às condições ambientais do teste de *free cooling*, a umidade média em todo o período é de 47,5%, mostrando inicialmente 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 apresente uma temperatura aceitável, não satisfaz o parâmetro de umidade estabelecido pela norma TIA-942-A.

### E. Análise dos resultados

O estudo inicial da norma TIA-942-A permite identificar que não há necessidade de manter o sistema de refrigeração em 18°C para manter o ambiente dentro dos requisitos ambientais necessários. Manter a refrigeração entre os limites de 20°C e 25°C especificado na norma TIA-942-A (Tabela II) já mostra-se suficiente. 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.

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, obtém-se uma ótima eficiência energética 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 máxima economia de energia, com o desligamento do equipamento de refrigeração. Todavia, 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.

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. Os picos de potência no instantes da compressão do gás refrigerante, indica 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. Para este tipo de aplicação, destaca-se os equipamentos de refrigeração que utilizam a tecnologia *inverter*, dispondo do benefício da rotação contínua e variável, permitindo eliminar estes picos de consumo.

O monitoramento da temperatura, umidade relativa e ponto de orvalho possuem gráficos similares ao apresentado nos Testes 1, 2, 3 e 4, sendo também disponibilizados via interface do Zabbix. A Tabela VI apresenta todos os resultados consolidados dos experimentos realizados.

Tabela VI. RESULTADOS DOS EXPERIMENTOS DO PLANO DE TESTES.

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

Um fato interessante, que foi identificado nos experimentos, está relacionado ao uso das *triggers* do Zabbix, configuradas inicialmente para alterar a temperatura da sala através de comandos que emulam o protocolo do controle remoto do equipamento. Estes comandos são enviados através de uma 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.

## VII. CONSIDERAÇÕES FINAIS

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. 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 de monitoramento 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 pelos fabricantes. 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, elevando 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 controlar 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, estando 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.

Trabalhos paralelos estão sendo realizados para estimar se os parâmetros ambientais da sala de servidores estão de

acordo com as exigências especificadas em diversas normas técnicas, destacando-se a TIA-942-A, mas não descartando as demais normas existentes. Utilizando um método similar ao adotado no presente trabalho, é possível determinar se as novas faixas de temperatura e umidade podem trazer uma redução de consumo de energia ainda maior.

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 abril/2017.

## VIII. 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 sensoramento 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 sensoramento 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.

## IX. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio do Laboratório de Processamento Paralelo e Distribuído (LabP2D) no Centro de Ciências Tecnológicas (CCT) da Universidade do Estado de Santa Catarina (UDESC).

Esse trabalho foi financiado com recursos do Edital PIC&DTI 001/2015 da UDESC.

## REFERÊNCIAS

- [1] V. Turner, D. Reinsel, J. F. Gantz, and S. Minton, "The Digital Universe of Opportunities: Rich Data and the Increasing Value of the Internet of Things," EMC and IDC, USA, White Paper 1672, apr 2014.
- [2] F. C. Silva, "e-Book - Data Centers (CPD) para pequenas e médias empresas," Redes&Cia, White Paper, Apr. 2015.
- [3] E. Emerson, "Energy logic 2.0 new strategies for cutting data center energy costs and boosting capacity," Emerson Network Power, W.P. 03947-2012, 2012.
- [4] R. Morabito, "Power Consumption of Virtualization Technologies: an Empirical Investigation," *IEEE/ACM UCC 2015 SD3C*, 2015.
- [5] R. L. Villars and M. Shirer, "IDC Finds Growth, Consolidation, and Changing Ownership Patterns in Worldwide Datacenter Forecast," nov 2014.

- [6] S. Mittal, "Power Management Techniques for Data Centers: A Survey," *CoRR*, Apr. 2014, arXiv: 1404.6681.
- [7] M. David and R. Schmidt, "Impact of ASHRAE environmental classes on data centers," in *2014 IEEE ITherm*, 2014, pp. 1092–1099.
- [8] P. Delforge, "America's Data Centers Consuming and Wasting Growing Amounts of Energy," NRDC, 2014.
- [9] S. Mogami and S. Rodrigues, "Data centers para pequenas empresas," *Revista RTI*, vol. 167, p. 20, 2014.
- [10] B. Rubenstein and M. Faist, "DC cold aisle set point optimization through total operating cost modeling," in *IEEE-ITherm*, 2014, p. 1111.
- [11] T. Comerford, "How data center operators can avoid energy price hikes this winter," Data Center Knowledge, Jan. 2015.
- [12] J. Dai, M. M. Ohadi, D. Das, and M. G. Pecht, "Data center energy flow and efficiency," in *Optimum Cooling of DCs*. Springer NY, jan 2014, pp. 9–30.
- [13] E. Volk, A. Tenschert, M. Gienger, A. Oleksiak, L. Siso, and J. Salom, "Improving energy efficiency in data centers and federated cloud environments: Approaches and metrics," in *2013 3rd CGC*, sep 2013.
- [14] M. Rodriguez, L. Ortiz Uriarte, Y. Jia, K. Yoshii, R. Ross, and P. Beckman, "Wireless sensor network for data-center environmental monitoring," in *2011 5th ICST*, nov 2011, pp. 533–537.
- [15] I. Liaperdos, I. Paraskevas, S. Potirakis, and M. Rangoussi, "Building a low-cost network for power-quality monitoring with open-source-hardware nodes," in *7th MedPower 2010*, 2010, pp. 1–5.
- [16] M. P. Goldhar, "Um framework de métricas de produtividade e eficiência energética em data centers," Ph.D. dissertation, UFPE, Recife, 2009. [Online]. Available: <http://repositorio.ufpe.br:8080/xmlui/handle/123456789/2306>
- [17] B. Sharma, "Applications of data mining in the management of performance and power in data centers," DCSE, PSU, Tech. Rep., 2009.
- [18] B. Heller, S. Seetharaman, P. Mahadevan, Y. Yiakoumis, P. Sharma, S. Banerjee, and N. McKeown, "ElasticTree: Saving Energy in Data Center Networks," *NSDI*, vol. 10, pp. 249–264, 2010.
- [19] H. Geng, *Data Center Handbook*. John Wiley & Sons, Dec. 2014.
- [20] S. U. Khan and A. Y. Zomaya, *Handbook on Data Centers*. Springer, May 2015.
- [21] M. A. d. L. e. Silva, "Uma infraestrutura de comando e controle de data center para um conjunto de recursos computacionais," Tese, USP, Jun. 2009. [Online]. Available: <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3141/tde-01092009-151011/>
- [22] TIA-942, "ANSI/TIA-942 - Telecommunications infrastructure standard for data centers," Telecom. Industry Association (TIA), Standard 942, 2005.
- [23] M. Bailey, M. Eastwood, T. Grieser, L. Borovick, V. Turner, and R. Gray, "IDC Special Study: Data center of the future," apr 2007.
- [24] R. Arno, A. Friedl, P. Gross, and R. Schuerger, "Reliability of Data Centers by Tier Classification," *IEEE-IA*, pp. 777–783, Mar. 2012.
- [25] M. Andrea and B. Wallace, "Data Center Size and Density Standards," Data Center Institute Standards Endorsed, Tech. Rep. DCISE-001, 2014.
- [26] D. Symanski and C. Watkins, "380Vdc Data Center at duke energy," *Emerging Technology Summit at Electric Power Research Institute*, vol. 9, Nov 2010.
- [27] P. Thibodeau, "Data centers are the new polluters," Aug. 2014. [Online]. Available: <http://www.computerworld.com/article/2598562/data-center/data-centers-are-the-new-polluters.html>
- [28] EMBRATEL-Teleco, "A Conectividade das Empresas Brasileiras," 2015.
- [29] O. P. Sanchez and A. Cappelozza, "Antecedents of the adoption of cloud computing: effects of infrastructure, investment and size," *Revista de Administração Contemporânea*, vol. 16, no. 5, pp. 646–663, Oct. 2012.
- [30] U.S.D.E, "Data Center Master List of Energy Efficiency Actions," U.S. Department of Energy, Lawrence Berkeley National Laboratory, Tech. Rep. 8, Feb. 2016. [Online]. Available: <https://datacenters.lbl.gov/resources/data-center-master-list-energy>
- [31] H. Ye, Z. Song, and Q. Sun, "Design of green data center deployment model based on cloud computing and TIA942 heat dissipation standard," in *2014 IEEE IWECA*, 2014, pp. 433–437.
- [32] J.-P. Machado and M. Forina, "Operational energy Efficiency for Users (OEU); Referential specification to define sustainable levels of ICT Sites," France, ETSI GS OEU 006, p. 13, Jun. 2015.
- [33] S. Murugesan and G. R. Gangadharan, *Harnessing Green IT: Principles and Practices*, 1st ed. UK: Wiley, oct 2012.
- [34] L. Wang and S. U. Khan, "Review of performance metrics for green DC: a taxonomy study," *The Journal of Supercomputing*, oct 2011.
- [35] B. Hoogendoorn, D. Guerra, and P. v. d. Zwan, "What drives environmental practices of SMEs?" *Small Bus Econ*, vol. 44, no. 4, pp. 759–781, nov 2014.
- [36] X. Wang, A. V. Vasilakos, M. Chen, Y. Liu, and T. T. Kwon, "A survey of green mobile networks: Opportunities and challenges," *MNA*, pp. 4–20, feb 2012.
- [37] Y. Xu, Y. Deng, and L. Du, "Calculating the Power Usage Effectiveness of Data Centers by Using Weighted Average Workload," in *2013 8th 3PGCIC*, Oct. 2013.
- [38] F. Rossignaux, L. Lefevre, J. P. Gelas, and M. D. d. Assuncao, "A Generic and Extensible Framework for Monitoring Energy Consumption of OpenStack Clouds," in *IEEE 4th BdCloud*, dec 2014, pp. 696–702.
- [39] A. N. Toosi, K. Vanmechelen, F. Khodadadi, and R. Buyya, "An Auction Mechanism for Cloud Spot Markets," *ACM 11th TAAAS*, feb 2016.
- [40] R. E. Brown, E. R. Masanet, B. Nordman, W. F. Tschudi, A. Shehabi, J. Stanley, J. G. Koomey, D. A. Sartor, and P. T. Chan, "Server and data center energy efficiency: Public law 109-431," *USA Federal Congress*, 06/2008 2008.
- [41] M. Stansberry, "Uptime Institute - Data Center Industry Survey 2013," 2013.
- [42] B. Beamish, "DCIM Myths and Realities," BICSI Canadian Region Meeting, Ottawa, ON, Canada, Nov. 2012.
- [43] M. F. Neto, "Os principais sistemas de automação de data centers do mercado - DCIM," Fazion LTDA, White Paper, 2013.
- [44] J. E. Pultz, D. J. Cappuccio, A. Adams, F. D. Silva, N. Mishra, H. Cecci, and R. Kumar, "Magic Quadrant for Data Center Infrastructure Management Tools," Gartner Inc, Tech. Rep. G00259286, Sep. 2014.
- [45] M. Wiboonrat, "Data center infrastructure management WLAN networks for monitoring and controlling systems," in *2014 ICOIN*, Feb. 2014, pp. 226–231.
- [46] O. Jokonya, "Investigating Open Source Software Benefits in Public Sector," in *2015 48th HICSS*, Jan. 2015, pp. 2242–2251.
- [47] L. Congdon, "8 Advantages of using open source in the enterprise," Feb. 2015. [Online]. Available: <https://enterpriseproject.com/article/2015/1/top-advantages-open-source-offers-over-proprietary-solutions>
- [48] F. Genova, F. Bellifemine, M. Gaspardone, M. Beoni, A. Cuda, and G. P. Fici, "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 *4th ESCON*, may 2009, pp. 1–8.