

GreenHop: Open Source Environmental Monitoring for Small and Medium Data Centers

Daniel Scheidemantel Camargo*, Charles Christian Miers*, Guilherme Piegas Koslovski*, Mauricio Aronne Pillon*

* Programa de Pós-Graduação em Computação Aplicada – PPGCA

Departamento de Ciência da Computação - CCT

Universidade do Estado de Santa Catarina - UDESC – Joinville, SC – Brasil

e-mail: daniel@colmeia.udesc.br, {charles.miers, guilherme.koslovski, mauricio.pillon}@udesc.br

Resumo—Several organizations carry out the execution of their systems and data processing services in local processing centers, i.e. data centers (DC). However, small to medium-sized organizations usually do not have technical and financial conditions to monitor the climatic conditions of their DC. Thus, this may imply from excessive energy costs, drastic reduction of the lifespan of the equipment and the incorrect processing of data and systems. In this paper we present the open source based solution GreenHop that aims to perform environmental monitoring of the DC server room. This paper presents four tests with different temperature settings, which is also included the application of free cooling method. We present a comparison of the energy impact of all settings. Thus, we aim to provide ambiental monitoring of the DC server room while we keep the system customizable to implement and replicate.

I. INTRODUÇÃO

Recentemente, o impacto ambiental dos *Data Centers* (DCs), responsável por aproximadamente 2% do consumo energético mundial [1], tem sido fonte de diversas pesquisas [2]–[4]. O aumento do consumo de energia em DCs é maior do que os ganhos com eficiência energética [5], mesmo com a constante busca pela eficiência energética através de abordagens diferenciadas [6], [7], principalmente o desenvolvimento de hardwares mais eficientes e virtualização [8]. Isso ocorre devido ao crescimento contínuo dos DCs em quantidade, densidade e tamanho [9] para suprir a demanda computacional exigida pelos novos paradigmas, como a computação em nuvem, redes sociais, *streaming* de vídeo, etc. Todavia, enquanto parte da atenção pública está equivocadamente concentrada no impacto ambiental dos DCs de porte industrial (e.g., Google e Facebook), a maior parte da energia é de fato consumida por DCs de pequenas e médias empresas [10]. Adicionalmente, pesquisas mostram que o consumo de energia pela refrigeração da sala de servidores de um DC pode variar entre 25% a 40% do consumo total [11]–[13], sendo este o perdulário energético de pequenas e médias organizações [14] conhecidas por desconsiderarem a eficiência energética do sistema de refrigeração. A Figura 1 apresenta a proporção de consumo de um DC típico de pequeno a médio porte.

Dentre os custos operacionais de um DC, os gastos relacionados a energia elétrica possuem impacto considerável, contribuindo com aproximadamente 50% das despesas [16]. Um dos desafios encontrados por gestores é definir indicadores de eficiência para DC [17], permitindo conhecer o comportamento dos processos e serviços para gerenciá-los com mais precisão. Estes indicadores podem ser estabelecidos através do uso de uma solução de monitoramento, onde se destaca a crescente adoção por plataformas de licenças abertas (hardware e software) como opção às soluções proprietárias [18]. Tanto as condições ambientais de uma sala de servidores quanto o consumo energético dos equipamentos usados para refrigeração podem ser monitorados [11]. As condições ambientais de uma sala de servidores indicam como os equipamentos de refrigeração devem estar ajustados a fim de manter as condições adequadas de funcionamento, implicando assim no consumo de energia do DC.

O presente trabalho apresenta o desenvolvimento de uma solução de monitoramento para sala de servidores, denominada GreenHop, que permite verificar se as condições ambientais especificadas pelo gestor estão em conformidade. O monitoramento do consumo de energia possibilita conhecer o comportamento dos equipamentos de Tecnologia da Informação (TI) e dos sistemas de suporte. A métrica *Power Usage Effectiveness* (PUE) quantifica a eficiência energética do DC e permite avaliar o impacto da adoção de políticas relacionadas com esta métrica, tais como arrefecimento gratuito (*free cooling*). A solução GreenHop é disponibilizada sob a licença *open source* Apache V2.0, permitindo a replicação da solução e a modificação de acordo com as necessidades intrínsecas a DCs heterogêneas.

O restante do artigo está organizado da seguinte forma. A Seção II aborda em uma visão geral a classificação, as principais normas para DCs, a necessidade de monitoração ambiental e as políticas de eficiência energética. Com base nesta norma, são identificados os aspectos a serem monitorados, aplicados na Seção V. A Seção III descreve as principais soluções e trabalhos correlatos para monitoramento ambiental de DC com ênfase para soluções de software e hardware *open source*. Na Seção IV são analisados e descritos

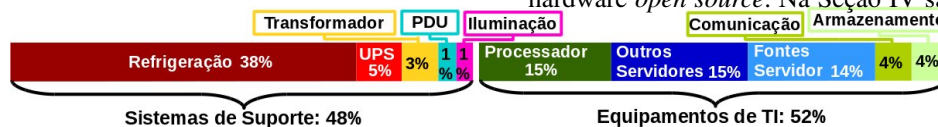


Figura 1. Análise da demanda e oferta de energia em DC. Adaptado de [15].

os principais componentes para uma solução de monitoramento de DC. Com base na fundamentação das seções iniciais, a Seção V descreve a solução GreenHop, uma solução de monitoração para sala de servidores de DC. O ambiente de estudo de caso é descrito na Seção VI, na qual é aplicada a solução GreenHop sob o rigor do plano de teste descrito na Seção VII. Os resultados dos quatro testes realizados são analisados na Seção VIII. Por fim, a Seção IX lista as principais considerações sobre a solução GreenHop.

II. DATA CENTER

Com o objetivo de abranger ambientes heterogêneos, um DC pode ser definido como uma instalação física especializada em abrigar sistemas computacionais tais como servidores, dispositivos de armazenamento e equipamentos de rede [19]. A sua infraestrutura usualmente conta com sistemas de suporte, tais como equipamentos de ar condicionado, distribuição de energia (*power distribution unit* (PDU)) e transformadores, permitindo que os sistemas computacionais funcionem de forma adequada. Em uma camada de maior confiabilidade, o DC pode ter recursos redundantes, sistemas de energia ininterrupta (UPS), etc. Constituindo o estado-da-arte, o DC deve dispor de um sistema de monitoramento ambiental e de segurança física/patrimonial específicos para esta instalação. Um DC típico pode ser organizado em um ou mais sub-espacos [20], sendo a sala de servidores o local que abriga os equipamentos computacionais e que necessita operar em condições ambientais controladas para o correto funcionamento dos servidores.

A. Classificação de Data Centers

Existem diferentes classificações de DC na literatura [21], [22]. A classificação por porte do DC [21] (Tabela I) auxilia a compreensão das diferentes proporções que um DC pode ter, definindo categorias de acordo com a quantidade de servidores.

Tabela I. CLASSIFICAÇÃO DC POR PORTE. ADAPT. DE [23].

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 / Dezenas	3
Armário de Servidores	1 a 2	2

Em um DC tradicional de grande porte, normalmente categorizado como DC Médio e DC Empresarial, os servidores são consolidados em *racks*, montados em piso elevado. Os *racks* são alinhados em fileiras, formando corredores frios e quentes, enquanto o ar frio é insuflado por dutos sob o piso. Por outro lado, DCs de pequeno porte, *i.e.*, de categorias DC Local, Sala ou Armário de Servidores, normalmente não possuem uma infraestrutura adequada para garantir a mesma eficiência energética quando comparado a um DC de grande porte. As instituições que pretendem possuir armário/sala de servidores como único ambiente de infraestrutura de TI, devem aplicar boas práticas durante o planejamento, implantação e operação [7], de forma que as operações de dados possam manter-se seguras e com alta disponibilidade [24]. Contudo, a realidade, para a maior parte de empresas de categorias menores, é de empregar servidores legados em espaços inadequados de operação. Normalmente, são usados pequenos

ambientes que não foram desenvolvidos para abrigar ativos de TI, empregando um sistema de refrigeração de conforto, tipo *split*, em um espaço limitado que restringe a organização dos servidores em corredores quente e frio [7]. O resultado, de uma refrigeração ineficiente, é o desenvolvimento de pontos de calor inalcançáveis pelo ar condicionado. O efeito da sobrecarga de temperatura em processadores e memória RAM pode diminuir consideravelmente a vida útil ou até mesmo gerar resultados operacionais indesejados [25]. Adicionalmente, a baixa umidade do ambiente pode causar descargas eletrostáticas, enquanto a alta umidade em conjunto com sais deliquescentes, contidos no ar, podem causar a corrosão de circuitos ou ainda, quando em contato com poeira higroscópica, podem causar falhas por isolamento de contatos [17], [26].

Existem diversas normas que estabelecem critérios para operação adequada dos equipamentos de TI em um ambiente de DC. Possíveis resultados destas boas práticas podem ser a redução do consumo de energia e o aumento da vida útil dos equipamentos. Neste sentido, torna-se necessário o controle climático em DCs de todas as categorias, permitindo uma gerência para operarem dentro dos limites estabelecidos.

B. Normas técnicas para Data Centers

Um DC heterogêneo normalmente hospeda equipamentos de diferentes fabricantes, sendo complexo atender a todas as especificações. Contudo, as normas técnicas estabelecem uma padronização durante as fases de planejamento, desenvolvimento e operação de um DC. Estas normas definem boas práticas, fundamentadas em confiabilidade, eficiência e desempenho [27]. São exemplos de normas: ASHRAE, CENELEC-50600, ANSI/BICSI-002, ANSI/TIA-569C e a ANSI/TIA-942-A, sendo a última amplamente utilizada [27].

Com o objetivo de fornecer diretrizes para as fases de planejamento, desenvolvimento e operação de um DC, a norma TIA-942-A, padronizada pela ANSI desde 2005, é organizada em quatro principais aspectos [20], sendo o foco deste trabalho as considerações ambientais. Considerando a necessidade de disponibilidade de um DC e dos seus sub-sistemas, é importante que o monitoramento ambiental seja contínuo e permanente. A Tabela II relaciona os requisitos estabelecidos pela norma TIA-942-A [20] 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. [20].

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 é constituído pelo rigor dos sistemas de refrigeração, necessários para manter a condição ambiental de acordo com as especificações ambientais adotadas [28]. 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. Para reduzir o consumo de energia em DCs, podem ser adotadas determinadas políticas que permitem 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. As especificidades destas políticas variam de acordo com as características da organização, desde a atividade-fim desenvolvida até os tipos de equipamentos existentes, e, ainda, conforme a situação externa, 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, como as estabelecidas no documento “*Data Center Master List of Energy Efficiency Actions*” [7], 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 fáceis de serem colocadas em prática. Uma destas ações é a eficiência energética, que pode ser obtida mantendo a TBS próxima ao limite superior e desta forma o uso do equipamento de ar condicionado é reduzido. Porém, em regiões geográficas favorecidas por um clima de temperatura média anual abaixo do limite da TBS, a alternativa de aplicar a técnica do *free cooling* permite o resfriamento gratuito, eliminando ou reduzindo 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 da exaustores, poupando-se energia de um modo significativo. Todavia, para se certificar que a técnica é satisfatória, é importante contar com uma solução de monitoramento ambiental que permita avaliar se os parâmetros de temperatura, umidade e ponto de orvalho estão dentro das faixas especificadas pelas normas.

O ambiente de um DC é dinâmico e as demandas exigem um nível complexo de gerenciamento [29]. 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 proprietário [30] e em alguns casos invasivo, *i.e.*, exigem alguma alteração da estrutura pré-existente para incorporá-los à sistemas legados.

III. SOLUÇÕES DE MONITORAMENTO CORRELATAS

Uma solução de monitoramento ambiental para DCs típicos faz parte de uma plataforma maior, denominada *Data Center Infrastructure Management* (DCIM) [31], dedicada ao gerenciamento completo da infraestrutura. Esta plataforma permite ao gestor obter uma visão holística de todos os processos de um DC, que varia desde a organização e inventários dos equipamentos até a visualização de recursos e pontos críticos, facilitando a análise e planejamento de mudanças quando apropriado. Atualmente, o uso de DCIM é visto como uma solução técnica e de negócio. Solução técnica, por permitir a análise de recursos específicos, e de negócios, por possibilitar a redução de custos assim como o aumento do desempenho do DC [32].

Impulsionadas por indicadores positivos quanto a utilização de plataformas DCIM em DCs [33], empresas de TI de renome lançaram suas soluções para se posicionar neste mercado.

Destacam-se as multinacionais Emerson Network Power¹, Schneider Electric², Nlyte Software³, Commscope⁴, Panduit⁵ e, no Brasil, a Fazion⁶. No entanto, não foi possível identificar uma definição de líderes de mercado deste segmento. Estas plataformas DCIM são normalmente utilizadas em DCs de médio a grande porte devido ao seu alto custo de implantação. Para pequenos e médios DCs, que possuem poucos equipamentos, esta alta capacidade de gerenciamento acaba sendo subutilizada e o foco primário volta-se às condições ambientais e operacionais dos equipamentos.

Existem diversas soluções específicas para monitoramento ambiental de DCs, divergindo entre si em relação às metodologias. Isso ocorre devido ao fato de tentar solucionar necessidades distintas, peculiares a ambientes de DCs heterogêneos [34]. O foco do presente trabalho está voltado a soluções *open source*, após pesquisa não exaustiva, encontrou-se as seguintes soluções para monitoramento ambiental que seguem as especificações das soluções providas por plataformas DCIM.

A. Soluções Open Source

Tecnologias que utilizam licenças livres *open source* vem ganhando notoriedade nos últimos anos e sendo empregadas em setores diversos [35]. Isso ocorre devido a desmistificação de conceitos conservadores e benefícios que permeiam o uso das tecnologias *open source*. Dentre estes benefícios, destacam-se a independência tecnológica, custo reduzido de implantação, segurança da informação, interoperabilidade e personalização permitindo satisfazer requisitos diversificados [35], [36]. 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 [37].

Para o caso de uma solução de monitoramento para DCs, o benefício de empregar soluções que utilizam padrões abertos, é a possibilidade de adaptação e expansão, além dos benefícios citados anteriormente. Uma das formas encontradas por gestores de DC com pouco recurso financeiro, é desenvolver o próprio sistema de monitoramento, por vezes buscando projetos pré-existent e adequando-os à aplicação em um ambiente crítico de DC. Sendo o uso de hardware e software *open source* o foco do presente trabalho, foram identificadas poucas soluções documentadas e que sejam voltadas especificamente ao monitoramento ambiental da sala de servidores, estando aberta a possibilidade de um dos componentes não estar sob a mesma classe de licença. Trabalhos correlatos identificados:

- SproutBoard [38]: É oferecida uma solução simples para verificar apenas temperatura e umidade com Arduino e *Shield* Ethernet que possibilita acessar um servidor dentro de cada Arduino. Os conectores dos sensores estão dispostos em um chassi que se adapta ao *rack* de servidores.

¹Trellis - <http://www.emersonnetworkpower.com>

²InfraStruXure - <http://www.schneider-electric.com>

³Nlyte - <http://www.nlyte.com>

⁴iTracks CPIM - <http://www.itracs.com>

⁵SynapSense - <http://www.synapsense.com>

⁶DataFaz - <http://www.datafaz.com>

- Envmon [39]: A solução EnvMon se utiliza de um computador Raspberry Pi (placa única) em cada nodo da rede de sensores, nos quais os dados são armazenados localmente e cada nodo conectado à rede por cabos Ethernet. Os dados são acessados através do RRDtool.
- TOMBOX [40]: A solução TOMBOX utiliza o software de monitoramento Zabbix⁷ para armazenar e visualizar os dados coletados por sensores nos nodos Arduinos conectados por uma rede guiada Ethernet.
- Rodriguez *et. al.* [11]: A solução com mais recursos, utiliza-se de uma Rede de Sensores Sem Fio (RSSF) com nodos com Arduino e protocolo ZigBee para comunicação sem fio. O software utilizado para gerenciar os dados é implementado em linguagem proprietária MatLab. Este trabalho foi incluído na análise devido ao reconhecimento científico, embora não seja *open source*, foco deste artigo.

A Tabela III consolida os trabalhos correlatos identificados, usando como base: o protocolo utilizado na comunicação entre os nodos, o software para visualizar os dados monitorados, o equipamento responsável pelo armazenamento dos dados coletados e o Microcontrolador (MCU) usado nos nodos.

Tabela III. SOLUÇÕES DE MONITORAMENTO, SALA DE SERVIDORES.

Requisitos	SproutBoard	EnvMon	Rodriguez	TOMBOX
Protocolo	Ethernet	Ethernet	ZigBee	Ethernet
Software	Página HTML	RRDtool	MatLab	Zabbix
Processamento	PC	Raspberry Pi	PC	PC
Tipo MCU	Arduino	Arduino	Arduino	Arduino
Normas	Não	Não	Não	Não
Temperatura	Sim	Sim	Sim	Sim
Umidade	Sim	Sim	Sim	Sim
Ponto de orvalho	Não	Não	Não	Não
Pressão atm	Não	Não	Não	Não
Energia	Não	Não	Não	Não

Nenhuma das soluções correlatas faz a análise de parâmetros ambientais que vão além de temperatura e umidade. 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 a solução de Rodriguez *et. al.* utiliza conceitos de RSSF, a TOMBOX faz uso de ferramenta de software de monitoramento, como o Zabbix e o EnvMon usa 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 relevantes para um ambiente de DC. Neste contexto, um exemplo pode ser a escolha de um computador como *single board* que seja capaz de processar a demanda de dados de monitoramento.

IV. ANÁLISE E DEFINIÇÃO DOS COMPONENTES DE UM SISTEMA DE MONITORAMENTO

O processo de tomada decisão, para a escolha dos componentes do sistema de monitoramento ambiental, foi feito através da análise de especificações do ambiente a ser monitorado, permitindo escolher o componente de acordo com as características de faixa de operação e acuidade. Com a análise das soluções correlatas, identificou-se as características a serem observadas ao desenvolver uma solução de monitoramento. Foram levantadas algumas características básicas para uma solução de monitoramento de DC, destacando-se: RSSF para eliminar a necessidade de cabos [31] e desvincular o sistema de monitoramento do sistema de processamento; MCU em cada nodo para o uso de sensores e protocolos variados; computador *single board* como processamento e armazenamento central da rede, de forma a não ocupar um computador *desktop* ou servidor local para a aplicação [41]; e software capaz de gerenciar todas as informações geradas, preferencialmente, um que já seja usado para o gerenciamento de DC.

Na pesquisa realizada, buscou-se componentes com boa qualidade, baixo valor de aquisição, presença de mercado, e de fácil implementação. Além dos componentes das soluções correlatas terem maior preferência, por já terem sido testadas em um ambiente de DC, foram relacionados com outros visando a integração e compatibilidade entre si. Por tratar-se de uma solução com licença *open source*, os componentes de software ou hardware escolhidos também devem ter este mesmo tipo de licença. Componentes selecionados:

- Protocolos de comunicação: Dentre os módulos sem fio, destaca-se o IEEE 802.15.4 ZigBee, devido ao baixo consumo de energia, a possibilidade de uso de criptografia e a formação de topologia *mesh* [42].
- MCU: Diversas plataformas de prototipagem facilitam o uso de MCU por placas de circuito impresso, destacando-se a solução Arduino⁸ (MCU da ATMEL) devido a disponibilidade no mercado e difusão.
- Unidade de processamento: Com o objetivo de prover uma solução *turn-key*, computadores de placa única tornam-se uma solução portátil, de baixo consumo de energia e economicamente acessível. O modelo Banana Pi⁹ foi eleito por suportar a carga computacional necessária para o software de monitoramento Zabbix, do MySQL e por ter uma porta SATA para HD, aumentando o desempenho de E/S do MySQL.
- Sistema Operacional: O Raspbian¹⁰ é um Sistema Operacional (SO) baseado no Debian 7 e otimizado para plataformas ARM, sendo um SO indicado para o Banana Pi, devido sua estabilidade. A linguagem Python foi selecionada por ser nativa no Raspbian e por permitir integrar o Zigbee ao Zabbix.
- Software de Monitoramento: Buscou-se utilizar um software já conhecido por gestores de TI [43], para que a solução proposta seja integrada às ferramentas que possam já estar em uso. Foi selecionada a ferramenta

⁸<http://www.arduino.cc>

⁹<http://www.lemaker.org>

¹⁰<https://www.raspbian.org>

⁷<http://www.zabbix.com/>

Zabbix (versão 2.4.3) por satisfazer os requisitos básicos do hardware do Banana Pi, permitindo executar os módulos *Zabbix Server*, *Zabbix Agent* e *front-end Web* sem gargalos no processamento, memória e armazenamento, restritos no Banana Pi. O Zabbix fornece visualização altamente configurável por diversos gráficos em tempo de leitura dos sensores, além das ferramentas de alerta para notificação remota.

Com base na análise das soluções correlatas e dos requisitos do ambiente do estudo de caso (Seção VI), foi possível estabelecer o conjunto de componentes que fazem parte da solução GreenHop. Tais componentes são: Rádios Zigbee, MCU Arduino, computador Banana Pi com SO Raspbian e software de monitoramento Zabbix. A especificação dos sensores está descrita juntamente com a solução.

V. SOLUÇÃO DE MONITORAÇÃO PROPOSTA: GREENHOP

A solução denominada GreenHop, proposta para o monitoramento ambiental de DCs, tem por objetivo manter a sala de servidores dentro dos valores operacionais estabelecidos pelo padrão adotado pelo gestor, *e.g.*, as normas técnicas. Com a aplicação da solução proposta, obtêm-se dois benefícios diretos: o aumento na eficiência energética dos sistemas de refrigeração da sala de servidores e o aumento da vida útil dos ativos de TI. A eficiência é obtida com a redução do consumo de energia do sistema de refrigeração, mantendo a temperatura de operação próximo ao limite superior estabelecido pela norma técnica adotada. Em caso de aumento da potência de refrigeração, afim de reduzir a temperatura para 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.

A solução GreenHop permite ao gestor avaliar o impacto sobre as alterações climáticas internas causadas por diversos fatores. Toma-se como exemplo, a detecção de pontos de calor, visando: (i) auxiliar na tomada de decisões sobre a organização (*layout*) dos servidores; (ii) estabelecer um balanceamento de carga baseado na distribuição da temperatura, ou ainda de forma mais específica; e (iii) verificar se o sistema de refrigeração está bem dimensionado para a demanda gerada. De forma indireta, a solução permite auxiliar na determinação da influência de fatores desconhecidos, como por exemplo, o impacto do clima externo (estações do ano) em decorrência da abertura e fechamento da porta de acesso da sala de servidores.

São exclusivamente utilizados componentes *open source* no desenvolvimento do GreenHop, afim de permitir ao gestor adequar a solução aos requisitos singulares de seu ambiente de DC, além dos benefícios já especificados na Seção III-A. A partir da análise dos componentes descritos na Seção IV, foram selecionados os hardwares: Arduino para os nodos, computador Banana Pi para processamento/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*) e banco de dados MySQL, ambos sobre o sistema operacional GNU/Linux Raspbian, bem como um conjunto de *scripts* em Python, desenvolvidos para fazer o tratamento dos dados recebidos pela RSSF e o envio para o Zabbix.

A. Características dos nodos

A RSSF da solução GreenHop é basicamente composta por dois tipos de nodos: final e coordenador. Os nodos finais realizam o sensoriamento dos parâmetros desejados, permitindo o uso de até treze sensores distintos por ponto monitorado (cada nodo). 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 de bibliotecas. O nodo coordenador, conectado ao Banana Pi, recebe todas as informações enviadas pelos nodos finais.

O protocolo ZigBee faz a coordenação do acesso entre os nodos, para organizar o recebimento dos dados por 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 formada em ambientes menores que 30 metros quadrados, como é o caso ilustrado na Figura 2.

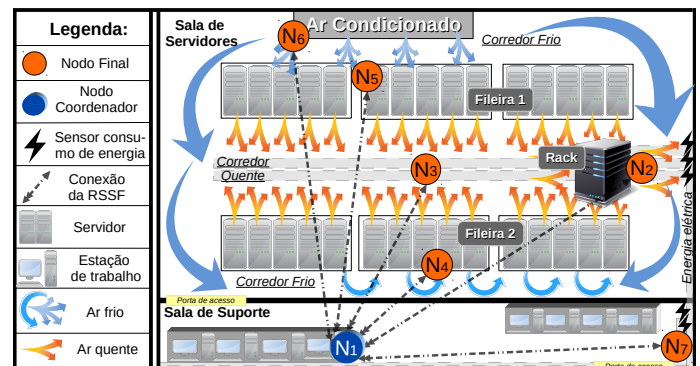


Figura 2. Exemplo para distribuição dos nodos em um ambiente.

Os nodos finais estão dispostos de forma a identificar os fluxos de ar quente e frio, formados nos corredores em que os equipamentos de TI estão posicionados. Desta forma, busca-se identificar as condições ambientais na parte frontal dos servidores, onde o ar é aspirado, e na saída do sistema de exaustão, para verificar a influência no retorno de ar quente. Um dos nodos finais está posicionado diretamente na saída do ar condicionado, para possibilitar a análise da mudança das condições ambientais até a entrada de ar dos equipamentos a serem refrigerados (que também possuem sensores).

Um nodo é posicionado na área externa da sala de servidores, mas interna ao laboratório, para 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. Salienta-se que este intervalo de mensuração é configurável de acordo com a precisão desejada e de acordo com o número de nodos alocados para a RSSF.

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. Todavia, o uso de baterias nos nodos para soluções de monitoramento em DC limita a granularidade necessária nas amostras e processo de coleta. Embora os protocolos de RSSF foquem em preservação de energia, a captação dos dados em curtos intervalos (três segundos) exige a alimentação dos nodos por fontes. Uma abordagem intermediária é utilizar as baterias como um sistema de *uninterruptible power supply* (UPS), sendo constantemente carregadas e acionadas apenas em casos de falta de energia.

O tempo de leitura entre os envios de pacotes é configurável, permitindo ajustar a resolução do monitoramento conforme a precisão desejada. 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, sendo a agregação dos dados realizada pela média aritmética de cada métrica. Neste método, o MCU só é suspenso devido às 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 o tempo máximo depende da capacidade de armazenamento do Arduino utilizado, neste caso de 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.

Outra abordagem possível é efetuar o envio imediato a cada período de leitura, sem armazenamento e processamento de agregação dos dados nos nodos finais. Esta abordagem foi descartada por entender que o impacto de períodos de observação longos (até quinze minutos) na agregação dos dados prejudicaria a precisão das medidas. No entanto, esta abordagem é interessante para nodos alimentados apenas por baterias, pois os nodos sem processamento entram em um estado de suspensão e reduzem o consumo de energia.

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 a 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.

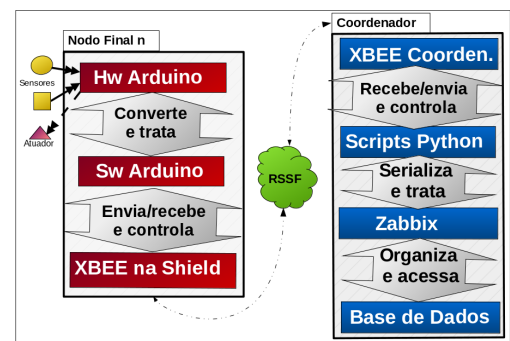


Figura 3. Fluxo dos dados entre Nodos Finais e Nodo Coordenador.

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. 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 e que os pacotes enviados sejam compatíveis com o padrão estabelecido no GreenHop.

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 [44]: 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 VI). 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
	DS18B20	1mA	0,5°C	-55~125°C
Umidade	DHT22	4,3mA	2%	0~100%
Pressão Atmosférica	BMP085	12µA	1,5hPa	300~1100hPa
	BMP180	5µ	0,06hPa	300~1100hPa
Consumo Energético	SCT013-000	NA	3%	0~100A
	ACS 714	NA	1,5%	±30.A

A operação e o tratamento dos dados obtidos pelos sensores é feito localmente no nodo, 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 porcentagem, a pressão atmosférica em hectoPascal (ou millibars) e o consumo de energia em Watts. O parâmetro ponto de orvalho é calculado no Banana Pi, usando a temperatura e a umidade relativa instantaneamente como base, aplicando a fórmula utilizada pela *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA). 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, se necessário. Os requisitos mínimos podem variar de acordo com o ambiente a ser aplicado a solução GreenHop e de acordo com a norma adotada.

VI. 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 VII. 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 é constituído pelos equipamentos de TI: trinta computadores *desktops*, um *rack* com quatro servidores de *rack* e quatro *switches* gerenciáveis. Salienta-se que durante toda a fase de testes, o laboratório manteve-se com esta configuração. 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 computadores *desktop* empregados como nodos 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, 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*, cinco *desktops* de operação e iluminação com 480 Watts de potência. Mesmo caracterizado como um laboratório de pesquisa, todos os equipamentos de TI e sistemas de suporte são mantidos em funcionamento contínuo, exceto a iluminação que é ligada apenas enquanto a sala está ocupada.

Uma das características da solução GreenHop é ser independente da infraestrutura do laboratório, tanto computacional quanto de rede. Antes da implantação da solução GreenHop, os responsáveis pelo laboratório desconheciam o funcionamento da dinâmica dos parâmetros ambientais com exatidão. O ar condicionado tinha seu termostato constante definido a 18°C. Com esta temperatura ambiente, os responsáveis esperavam garantir que os equipamentos não fossem danificados devido ao excesso de calor. Por outro lado, ignorava-se o consumo de energia e a eficiência deste DC, assim como as potencialidades do uso da técnica de *free cooling* na região de Joinville-SC/Brasil.

VII. PLANO DE TESTES

O plano de testes é elaborado de forma a possibilitar uma comparação fidedigna dos parâmetros ambientais antes e depois da aplicação da solução GreenHop. As especificações da norma *Telecommunications Industry Association* (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 II. No 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.

A. Organização dos nodos

Os nodos foram distribuídos em pontos estratégicos do DC 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, um nodo (N_2) está posicionado na saída de ar quente do *rack*, um nodo (N_3) no meio do corredor quente formado pelos computadores *desktops*, dois nodos (N_4 e N_5) nos corredores frios, um nodo (N_6) na saída do ar condicionado e um nodo (N_7) no quadro de energia, externo à sala de servidores, mas ainda dentro do laboratório. Todos os nodos finais, com exceção do N_6 , 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.

A pressão atmosférica é um parâmetro que ainda está em período de análise. Este parâmetro não é estabelecido pela norma TIA-942-A, mas é 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, permitindo que ações possam ser tomadas para aumentar a eficácia da refrigeração. Porém, em ambientes que não contam com essa estrutura, a relação entre a pressão da quantidade de ar dentro do ambiente e a dificuldade de enviar ar frio para o local necessário são inversamente proporcionais [45], [46]. Com isto, existe também a possibilidade de obter alguma eficiência energética através da alteração da velocidade da ventilação do ar condicionado.

B. Verificação do consumo de energia

O consumo de energia é quantificado 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. A solução GreenHop permite a análise, em tempo de leitura do consumo de energia dos equipamentos de TI e de suporte, e calcula métricas PUE e *Data Center Infrastructure Efficiency* (DCiE) com a mesma precisão do tempo de leitura. Entretanto, para o presente plano de testes foram utilizados apenas os resultados obtidos do consumo do equipamento de ar condicionado.

Os resultados esperados da aplicação dos testes é a redução do consumo de energia elétrica do sistema de refrigeração. 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 identificar 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 análise da aplicação da técnica do *free cooling*, foi utilizado apenas o PUE como referência de comparação entre os testes.

C. 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 média registrada para o período é de 22°C. Foram coletados quase um milhão de registros em cada teste, variando entre dados ambientais, energéticos e de relatório.

D. 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.

E. 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. Esse valor de temperatura foi eleito, 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.

F. 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/Brasil¹¹, 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.

G. Consolidação do plano de teste

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 temperatura interna em que o equipamento de 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 dos testes de sete dias e os sensores utilizados são características comuns à todos os quatro testes realizados.

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

Durante todos os testes é utilizado a mesma organização dos nodos e feita a verificação do consumo de energia. A Figura 2 reflete exatamente a topologia do LabP2D e a distribuição dos nodos. Utilizar um plano bem definido e executado sob rigor, possibilita obter os resultados corretos de forma que os testes possam ser igualmente equiparados.

VIII. RESULTADOS OBTIDOS & ANÁLISE

Todos os resultados obtidos foram feitos sob análise dos gráficos fornecidos pelo *front-end* do Zabbix, os quais mostram em sua legenda os valores de mínimo, máximo, médio e o último valor lido, dentro do período de tempo selecionado. Para melhor visualização, é mostrado uma parte do gráfico do Zabbix, com o objetivo de auxiliar na compreensão dos

¹¹<http://www.climatempo.com.br/climatologia/381/joinville-sc>

detalhes do comportamento, tendo em vista que na maior parte do tempo o mesmo comportamento se repete. 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, possibilitando associar o comportamento de consumo com a variação térmica.

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 ΔT , 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. 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 a 18°C, constatou-se uma média de consumo de energia do equipamento de refrigeração de 1,13kWh, equivalente ao consumo diário de 27,12kW. De acordo com a Figura 4, no marcador ΔT , 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 4 mostra o gráfico de comportamento das temperaturas e do consumo de energia, apresentando o valor médio para o período selecionado de 30 minutos.

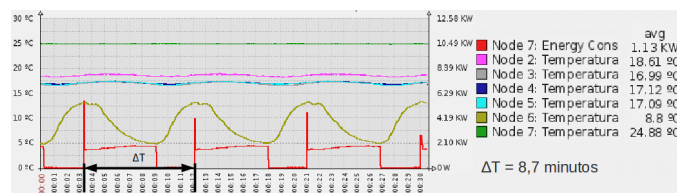


Figura 4. Gráfico das temperaturas e consumo de energia a 18°C.

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%.

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, o que corresponde a um valor médio diário de 12,5kW. 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 5, no marcador ΔT , 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 5 mostra o gráfico de comportamento das temperaturas e do consumo de energia, apresentando o valor médio para o período selecionado de 30 minutos.

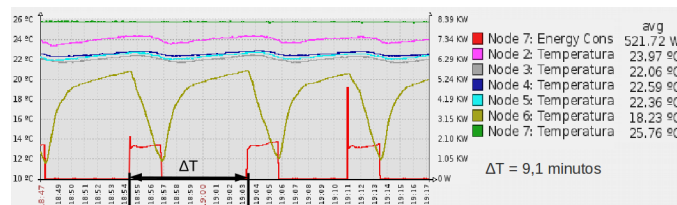


Figura 5. Gráfico das temperaturas e consumo de energia a 23°C.

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 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.

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, que resulta em um total diário de 5,64kW. 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, no marcador ΔT , 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 mostra o gráfico de comportamento das temperaturas e do consumo de energia, apresentando o valor médio para o período selecionado de 26 minutos.

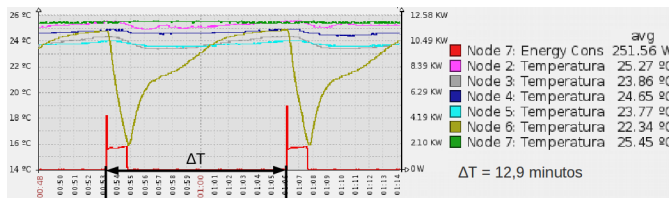


Figura 6. Gráfico das temperaturas e consumo de energia a 25°C.

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 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.

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). 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 7 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*.

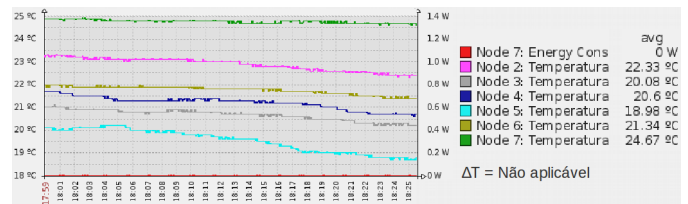


Figura 7. Gráfico do comportamento das temperaturas durante o *free cooling*.

Em relação à umidade, verifica-se uma média 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 garanta uma ótima temperatura, não mostra-se satisfazer os limites do parâmetro de umidade estabelecido pela norma TIA-942-A.

E. Consolidação dos resultados

Os resultados permitiram identificar que não há necessidade de manter o sistema de refrigeração em 18°C para manter o ambiente seguro para as operações de dados. Manter a refrigeração dentro do limite de 20°C a 25°C especificado na norma TIA-942-A (Tabela II) já é suficiente. Manter a temperatura em 25°C, no limite superior estabelecido pela norma, 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, desativando o equipamento de refrigeração. Porém, para que o ambiente mantenha-se dentro das normas, faz-se necessário a inclusão de equipamentos ou técnicas de controle da umidade. Portanto, a técnica do *free cooling* só será melhor se o equipamento de controle da umidade consuma menos energia que o sistema de refrigeração a 25°C. 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 Teste 1 (18°C) e maior que o Teste 3 (25°C). Portanto, conclui-se que a configuração da temperatura em 23°C é 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.

As oscilações de consumo de energia, detectadas durante os experimentos, estão associadas aos momentos que o compressor do equipamento de refrigeração é ligado. O pico de consumo ocorre durante o acionamento do compressor para manter a temperatura da sala em 18°C, 23°C ou 25°C e, reduz consideravelmente durante o período de tempo que o compressor é desligado. O ciclo recomeça assim que a temperatura atinge novamente o limite e o compressor deve ser acionado. 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 instante 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 contínua e variável, permitindo eliminar estes picos de consumo.

O comportamento monitorado, da umidade relativa e do ponto de orvalho, possuem resultados similares aos apresentados nos gráficos anteriores (Testes 1 à 4) e também foram 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	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
Varição 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	—	Base	53,9%	79,2%	100%
ΔT 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	—

Na Tabela VI, as linhas dos parâmetros ambientais são comparados com os valores estabelecidos pela norma TIA-942-A. No entanto, o consumo energético e as métricas verdes não possuem a mesma comparação, pois considera-se que seus valores devam ser o menor possível.

A solução GreenHop também dispõe de atuadores implementados através *triggers* do Zabbix, inicialmente, configurados para atuarem na definição automática da temperatura do ar condicionado via infravermelho. Este atuador foi implementado no Nodo 6, mais próximo do equipamento de ar condicionado. Porém, a tomada de decisão e controle é do nodo Banana Pi. Visto que este processa os dados monitorados e quando identifica que a temperatura na sala ultrapassou o limite determinado, envia ao Nodo 6 o novo valor da temperatura desejada por através do protocolo ZigBee. No entanto, os experimentos mostraram que o equipamento de refrigeração possui um mecanismo muito eficiente para manter a temperatura ajustada. Fato é que o Banana Pi não acionou nenhuma vez o atuador de controle da temperatura instalado no Nodo 6 e, nos dados coletados, não houve nenhuma variação 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, podem utilizar esta abordagem não somente para alterar a temperatura sob demanda, mas também para ativar os equipamentos automaticamente para o revezamento ou para o caso de falhas.

IX. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O sistema de monitoramento disponível na 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 das condições ambientais em sala de servidores prevista na norma TIA-942-A. De forma geral, a solução GreenHop mostra-se satisfatória para as necessidades de monitoramento de diversos parâmetros, permitindo avaliar se as ações que objetivam reduzir o consumo de energia não implicam em modificação nos parâmetros ambientais permitidos.

Para manter os servidores e equipamentos de comunicação 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 empresas. No entanto, mesmo para pequenas 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 constatado em relação ao 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 um disco SSD, seriam suficientes para permitir a aplicação simultânea de algumas centenas a milhares de nodos.

Trabalhos paralelos estão sendo realizados para estimar a análise de eficiência energética do DC como um todo, através do uso das métricas verdes PUE e DCiE. Nesta perspectiva, estas métricas permitem aplicar diversas políticas de eficiência energética e analisar o impacto obtido por determinadas ações. Utilizando uma metodologia similar a adotada no presente trabalho, é possível determinar apenas um valor para verificar a eficiência energética obtida.

Salienta-se que os testes foram realizados no período do outono brasileiro, sendo que a temperatura média na região para essa estação é 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.

X. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio do LabP2D, CCT / UDESC. Esse trabalho foi financiado com recursos do Edital PIC&DTI 001/2015 da UDESC.

REFERÊNCIAS

- [1] P. Delforge, "America's Data Centers Consuming and Wasting Growing Amounts of Energy," NRDC, 2014.
- [2] H. Bhagwat, A. Singh, A. Vasan, and A. Sivasubramaniam, "Thermal influence indices: Causality metrics for efficient exploration of data center cooling," in *IGCC 2012*, 2012, pp. 1–10.
- [3] J. A. Aroca, "Eficiencia energética en los centros de datos," Master's thesis, Universitat Politècnica de València, España, 2016.
- [4] P. Pegus, II, B. Varghese, T. Guo, D. Irwin, P. Shenoy, A. Mahanti, J. Culbert, J. Goodhue, and C. Hill, "Analyzing the efficiency of a green university data center," in *7th ACM/SPEC*, ser. ICPE '16. New York, NY, USA: ACM, 2016, pp. 63–73.
- [5] D. Sartor, "Better buildings, better data centers: Applying best practices," Rocky Mountain Green 2016. [Online]. Available: <https://datacenters.lbl.gov/resources/better-buildings-better-data-centers-0>
- [6] E. R. Masanet, R. E. Brown, A. Shehabi, J. G. Koomey, and B. Nordman, "Estimating the energy use and efficiency potential of u.s. data centers," *IEEE-JPROC*, vol. 99, no. 8, pp. 1440–1453, 2011.
- [7] 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>
- [8] R. Morabito, "Power Consumption of Virtualization Technologies: an Empirical Investigation," *IEEE/ACM UCC SD3C*, 2015.
- [9] R. L. Villars and M. Shirer, "IDC Finds Growth, Consolidation, and Changing Ownership Patterns in Worldwide Datacenter Forecast," nov 2014. [Online]. Available: <http://www.idc.com/getdoc.jsp?containerId=prUS25237514>
- [10] F. C. Silva, "e-Book - Data Centers (CPD) para pequenas e médias empresas," Redes&Cia, White Paper, apr 2015.
- [11] 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.
- [12] M. David and R. Schmidt, "Impact of ASHRAE environmental classes on data centers," in *2014 IEEE ITherm*, 2014, pp. 1092–1099.
- [13] B. Rubenstein and M. Faist, "DC cold aisle set point optimization through total operating cost modeling," in *IEEE-ITherm*, 2014, p. 1111.
- [14] H. Cheung, S. Greenberg, R. Mahdavi, R. Brown, and W. Tscudi, "Energy Efficiency in Small Server Rooms: Field Surveys and Findings," in *ACEEE Summer Study on Energy Efficiency in Buildings*, 2014.
- [15] 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.
- [16] T. Comerford, "How data center operators can avoid energy price hikes this winter," Data Center Knowledge, Jan. 2015.
- [17] 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.
- [18] H. C. Lee and H. H. Lin, "Design and evaluation of an open-source wireless mesh networking module for environmental monitoring," *IEEE Sensors Journal*, vol. 16, no. 7, pp. 2162–2171, 2016.
- [19] B. Sharma, "Applications of data mining in the management of performance and power in data centers," DCSE, PSU, Tech. Rep., 2009.
- [20] TIA-942, "ANSI/TIA-942 - Telecommunications infrastructure standard for data centers," Telecom. Industry Association (TIA), Standard 942, 2005.
- [21] M. Bailey, M. Eastwood, T. Grieser, L. Borovick, V. Turner, and R. Gray, "IDC Special Study: Data center of the future," apr 2007.
- [22] M. Andrea and B. Wallace, "Data Center Size and Density Standards," Data Center Institute Standards Endorsed, Tech. Rep. DCISE-001, 2014.
- [23] D. Symanski and C. Watkins, "380vdc Data Center at duke energy," *Emerging Technology Summit at Electric Power Research Institute*, vol. 9, Nov 2010.
- [24] S. Mogami and S. Rodrigues, "Data centers para pequenas empresas," *Revista RTI*, vol. 167, p. 20, 2014.
- [25] Y. Zhang, Z. Peng, J. Jiang, H. Li, and M. Fujita, "Temperature-aware software-based self-testing for delay faults," in *Design, Automation Test in Europe Conference Exhibition (DATE)*, 2015, Mar. 2015.
- [26] IBM Knowledge Center, "Critérios de Design Ambiental para instalação do servidor POWER7," Sep. 2013.
- [27] 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.
- [28] 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.
- [29] B. Beamish, "DCIM Myths and Realities," BICSI Canadian Region Meeting, Ottawa, ON, Canada, Nov. 2012.
- [30] 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.
- [31] M. Wiboonrat, "Data center infrastructure management WLAN networks for monitoring and controlling systems," in *2014 ICOIN*, Feb. 2014, pp. 226–231.
- [32] M. F. Filho and M. F. Neto, "Data center infrastructure management and automation systems: an evaluation method," *ISCA, CAINE*, Nov. 2012.
- [33] M. F. Neto, "Os principais sistemas de automação de data centers do mercado - DCIM: uma visão técnica e metodologias de escolha," 6th NetComm, SP, 2013.
- [34] E. Rotem, U. C. Weisser, A. Mendelson, A. Yassin, and R. Ginosar, "Energy management of highly dynamic server workloads in an heterogeneous data center," in *2014 24th PATMOS*, sep 2014.
- [35] O. Jokonya, "Investigating Open Source Software Benefits in Public Sector," in *2015 48th HICSS*, Jan. 2015, pp. 2242–2251.
- [36] 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>
- [37] B. Balter, "Open-Source Alternatives to Proprietary Enterprise Software," 2015. [Online]. Available: <http://ben.balter.com/open-source-alternatives/>
- [38] SproutBoard, "Technical Overview Guides - SproutBoard," 2013. [Online]. Available: <http://www.sproutboard.com/technical-overview>
- [39] R. J. Bubon, "Envmon," jul 2013. [Online]. Available: <http://www.big.com/wiki/Envmon>
- [40] M. Guardigli, "TOMBOX : An Arduino based solution for environmental monitoring of datacenter racks," nov 2011. [Online]. Available: <http://marco.guardigli.it/2010/05/arduino-in-datacenter-rack.html>
- [41] K. Raguvanan and J. Thiagarajan, "Raspberry PI based global industrial process monitoring through wireless communication," in *2015 IEEE-RACE*, Feb. 2015.
- [42] S. Park, M.-i. Choi, B. Kang, and S. Park, "Design and implementation of smart energy management system for reducing power consumption using zigbee wireless communication module," *The 4th ANT 2013, 3rd SEIT-2013*, vol. 19, pp. 662–668, 2013.
- [43] O. Marik and S. Zitta, "Comparative analysis of monitoring system for data networks," in *2014 ICMCS*, Apr. 2014.
- [44] 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 *2009 4th ESCON*, may 2009, pp. 1–8.
- [45] V. Arghode, T. Kang, Y. Joshi, W. Phelps, and M. Michaels, "Anemometric tool for air flow rate measurement through perforated tiles in a raised floor data center," in *SEMI-THERM*, 2015, Mar. 2015.
- [46] M. Sato, A. Matsunaga, M. Chiba, A. Shoujiguchi, and M. Yoshikawa, "Seeking an energy-efficient modular data center: impact of pressure loss on the server fan power," in *2015 ICEP-IACC*, 2015, pp. 617–622.