

**UNIVERSIDADE DO ESTADO DE SANTA CATARINA - UDESC
CENTRO DE CIÊNCIAS TECNOLÓGICAS - CCT
MESTRADO EM COMPUTAÇÃO APLICADA**

ADEMIR CAMILLO JUNIOR

MONTERDC - MONITORAMENTO TÉRMICO DE DATA CENTERS

JOINVILLE

2018

ADEMIR CAMILLO JUNIOR

MONTERDC - MONITORAMENTO TÉRMICO DE DATA CENTERS

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Computação Aplicada do Centro de Ciências Tecnológicas da Universidade do Estado de Santa Catarina, para a obtenção do grau de Mestre em Computação Aplicada.

Orientador: Dr. Maurício Aronne Pillon

JOINVILLE

2018

ADEMIR CAMILLO JUNIOR

MONTERDC - MONITORAMENTO TÉRMICO DE DATA CENTERS/ ADEMIR

CAMILLO JUNIOR. – Joinville, 2018-

96 p. : il. (algumas color.) ; 30 cm.

Dr. Maurício Aronne Pillon

– Universidade do Estado de Santa Catarina - UDESC, 2018.

1. Monitoramento Térmico de Data Centers. 2. Arquitetura MonTerDC. I.
Prof. Dr. Maurício Aronne Pillon. II. Universidade do Estado de Santa Catarina.
III. Centro de Ciências Tecnológicas. IV. Programa de Pós-Graduação em
Computação Aplicada

MONTERDC – Monitoramento Térmico de Data Centers

por

Ademir Camillo Junior

Esta dissertação foi julgada adequada para obtenção do título de

Mestre em Computação Aplicada

Área de concentração em “Ciência da Computação”,
e aprovada em sua forma final pelo

**CURSO DE MESTRADO ACADÊMICO EM COMPUTAÇÃO APLICADA
DO CENTRO DE CIÊNCIAS TECNOLÓGICAS DA
UNIVERSIDADE DO ESTADO DE SANTA CATARINA.**

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Maurício Aronne Pillon
CCT/UDESC (Orientador/Presidente)

Prof. Dr. Guilherme Piêgas Koslovski
CCT/UDESC

Prof. Dr. Tiago Coelho Ferreto
PUC-RS

Joinville, SC, 1º de agosto de 2018.

Dedico este trabalho em especial a minha esposa e meu orientador pela compreensão e dedicação.

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus familiares, amigos, colegas, professores e orientador que me acompanharam, deram apoio e que direta ou indiretamente participaram de alguma forma para que o objetivo fosse atingido.

“Nunca confie em um computador que você não pode jogar por uma janela.”

Steve Wozniak

RESUMO

O ambiente físico de um *Data Center* (DC) demanda diversos controles e sistemas de monitoramento para permitir o uso dos recursos de maneira otimizada e com o menor custo possível. Entretanto, diversos aspectos podem influenciar diretamente no desempenho e disponibilidade de recursos. Devido ao grande poder computacional presente neste ambiente, parte da energia consumida é convertida em calor, gerando assim, desafios no controle e gerenciamento de sistemas de refrigeração para DC. Estes sistemas de refrigeração são desenvolvidos e projetados especificamente para este tipo de ambiente, entretanto, para DC de pequeno e médio porte, o seu custo pode se tornar um impeditivo de implantação. Os sistemas *Computer Room Air Conditioner* (CRAC) presentes em DC de grande porte, seguem normas e regulamentações definidas pelos orgãos responsáveis. Por outro lado, os sistemas tradicionais, neste trabalho chamados de Não-CRAC, não tem o desempenho e recursos de controle necessários para otimizar o seu uso. Neste sentido, a arquitetura Monitoramento Térmico de Data Centers (MonTerDC) apresenta uma solução de monitoramento térmico para DC de pequeno e médio porte. O objetivo da arquitetura é prover uma solução de hardware e software aberto, de baixo custo, que auxilie o administrador na tomada de decisão. Os experimentos foram realizados em um ambiente real, *Laboratório de Processamento Paralelo e Distribuído* (LabP2D), DC de pequeno porte, ideal para a aplicação da solução. Os resultados apresentados avaliam o fluxo das correntes de ar e criação de zonas térmicas de acordo com a arquitetura MonTerDC.

Palavras-chaves: MonTerDC, Data Center, Térmico, Mapeamento.

ABSTRACT

The increment of information production has implied on the increasing of the amount and size of DC to meet this demand. The creation of small and medium DC has been a common practice adopted by several organizations, as well as large DCs used by public cloud computing providers. Large DCs own consolidated monitoring systems, while small and medium DCs typically do not have such systems due to its cost/complexity. We present No-CRAC Data Center Thermal Monitoring (*MonTerDC*), a temperature monitoring solution through sensing which allows to identify thermal zones and its temperatures on standards non-compliance. *MonTerDC* allows to analyze energy consumption and cooling system together, in order to assist DC administrators on decision making process. Our practical experiments have confirmed the usefulness of *MonTerDC* while revealing relevant information about thermal behavior in a small DC.

Key-words: *MonTerDC*, Datacenter, Thermal, Mapping.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Modelo de Serviços	29
Figura 2 – Projeto de Mapeamento de Sensores	43
Figura 3 – Monitoração de grão fino com sensoriamente <i>Internet of Things</i> (IoT)	44
Figura 4 – Estrutura de Camadas MonTerDC	48
Figura 5 – Detalhamento do Módulo Núcleo MonTerDC	50
Figura 6 – Fluxograma Operação de Parametrização	54
Figura 7 – Fluxograma da Operação Sensoriamento	55
Figura 8 – Fluxograma Operação Visualiza 3D	56
Figura 9 – Fluxograma Operação Gerenciamento	57
Figura 10 – Fluxograma da Operação Alarme	58
Figura 11 – Esquema de Comunicação entre os Módulos MonTerDC	59
Figura 12 – Projeto Físico do DC do LabP2D	64
Figura 13 – Comparação Maquete MonTerDC	65
Figura 14 – Blocos de Processamento	67
Figura 15 – Correntes de ar DC do LabP2D Split-1.	68
Figura 16 – Correntes de ar DC do LabP2D Split-2.	68
Figura 17 – Cenário 1: blocos de processamento <i>A</i> e <i>B</i> ativos.	70
Figura 18 – Cenário 2: blocos de processamento <i>A</i> e <i>D</i> ativos.	71
Figura 19 – Cenário 3: blocos de processamento <i>A</i> e <i>C</i> ativos.	72
Figura 20 – Cenário 4: blocos de processamento <i>D</i> e <i>C</i> ativos.	73
Figura 21 – Cenário 5: blocos de processamento <i>B</i> e <i>C</i> ativos.	74
Figura 22 – Cenário 6: blocos de processamento <i>B</i> e <i>D</i> ativos.	75
Figura 23 – Cenário 1: blocos de processamento <i>A</i> e <i>B</i> ativos.	77
Figura 24 – Cenário 2: blocos de processamento <i>A</i> e <i>D</i> ativos.	78
Figura 25 – Cenário 3: blocos de processamento <i>A</i> e <i>B</i> ativos.	79
Figura 26 – Cenário 4: blocos de processamento <i>A</i> e <i>B</i> ativos.	80
Figura 27 – Cenário 5: blocos de processamento <i>A</i> e <i>B</i> ativos.	81
Figura 28 – Cenário 6: blocos de processamento <i>A</i> e <i>B</i> ativos.	82
Figura 29 – Comparativo de Consumo por Cenário Split-1	83
Figura 30 – Comparativo de Consumo por Cenário Split-2	84

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Especificação de Equipamentos da Norma ASHRAE TC9.9	24
Tabela 2 – Comparação dos Gerenciadores de Cloud	32
Tabela 3 – Monitoramento térmico de ambientes de DC.	34
Tabela 4 – Protocolos de Comunicação em Dispositivos IoT	39
Tabela 5 – Requisitos Funcionais e de Negócio	45
Tabela 6 – Requisitos Não Funcionais	46
Tabela 7 – Tabelas e Campos do Banco de Dados	51
Tabela 8 – Rotas da <i>Application Programming Interface (API)</i>	52
Tabela 9 – Parametrização do Módulo Captores <i>IoT</i>	60
Tabela 10 – Descrição dos Servidores LabP2D	63
Tabela 11 – Descrição dos Componentes da Maquete LabP2D	64

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

DC *Data Center*

IoT *Internet of Things*

TI Tecnologia da Informação

GreenDC *Green Data Center*

GPU *Graphics Processing Unit*

GEC *Green Energy Coefficient*

WUE *Water Usage Effectiveness*

PUE *Power Usage Effectiveness*

CUE *Carbon Usage Effectiveness*

CFD *Computational Fluid Dynamics*

API *Application Programming Interface*

CRAC *Computer Room Air Conditioner*

DCiE *Data Center Infraestructure Efficiency*

UDESC *Universidade do Estado de Santa Catarina*

MonTerDC Monitoramento Término de Data Centers

LabP2D *Laboratório de Processamento Paralelo e Distribuído*

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

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	OBJETIVOS	16
1.2	METODOLOGIA E CONTRIBUIÇÕES	17
1.3	ORGANIZAÇÃO DO TEXTO	17
2	REVISÃO DA LITERATURA	19
2.1	DATA CENTER	19
2.1.1	Classificações e Normas	20
2.1.1.1	<i>ANSI/EIA/TIA942</i>	21
2.1.1.2	<i>ANSI/BICSI-002-2014</i>	22
2.1.1.3	<i>ASHRAE</i>	23
2.1.2	Sistemas de Refrigeração	24
2.1.3	Eficiência e TI Verde	25
2.2	COMPUTAÇÃO EM NUVEM	28
2.2.1	Modelos de Serviços	28
2.2.2	Tipos de Virtualização	29
2.2.3	Sistemas Gerenciadores de Nuvem	30
2.2.3.1	<i>OpenStack</i>	30
2.2.3.2	<i>CloudStack</i>	31
2.2.3.3	<i>OpenNebula</i>	31
2.2.3.4	<i>Eucalyptus</i>	31
2.2.3.5	<i>Comparação dos Gerenciadores de Nuvem</i>	32
2.3	CONSIDERAÇÕES PARCIAIS	32
3	MONITORAMENTO TÉRMICO EM DATA CENTER	34
3.1	<i>COMPUTER ROOM AIR CONDITIONER (CRAC)</i>	34
3.2	DINÂMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAIS	36
3.3	INTERNET DAS COISAS	37
3.4	CONSIDERAÇÕES PARCIAIS	40
4	SOLUÇÃO IOT MONTERDC	41
4.1	DEFINIÇÃO DO PROBLEMA	41
4.2	PROJETO DE IMPLANTAÇÃO DOS SENSORES	42
4.3	ESPECIFICAÇÃO DE REQUISITOS	45
4.4	ARQUITETURA MONTERDC	47

4.4.1	Hardware MonTerDC	49
4.4.2	Middleware MonTerDC	49
4.4.3	Administração	53
4.4.3.1	<i>Operação Parametrização</i>	53
4.4.3.2	<i>Operação Sensoriamento</i>	54
4.4.3.3	<i>Operação Visualiza 3D</i>	56
4.4.3.4	<i>Operação Gerenciamento</i>	57
4.4.3.5	<i>Operação Alarme</i>	58
4.5	PROTOTIPO DO MONTERDC	59
4.6	CONSIDERAÇÕES PARCIAIS	60
5	EXPERIMENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	62
5.1	DESCRÍÇÃO DO AMBIENTE DE TESTES	62
5.2	MAQUETE DO DC LABP2D	63
5.3	DESCRÍÇÃO DOS EXPERIMENTOS	66
5.4	EXPERIMENTAÇÃO E RESULTADOS	68
5.4.1	Cenário 1 - Split 1	69
5.4.2	Cenário 2 - Split 1	71
5.4.3	Cenário 3 - Split 1	72
5.4.4	Cenário 4 - Split 1	73
5.4.5	Cenário 5 - Split 1	74
5.4.6	Cenário 6 - Split 1	75
5.4.7	Cenário 1 - Split 2	76
5.4.8	Cenário 2 - Split 2	77
5.4.9	Cenário 3 - Split 2	78
5.4.10	Cenário 4 - Split 2	79
5.4.11	Cenário 5 - Split 2	80
5.4.12	Cenário 6 - Split 2	81
5.5	IMPACTO ENERGÉTICO DE ACORDO COM AS ZONAS TÉRMICAS	82
5.6	CONSIDERAÇÕES PARCIAIS	85
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	86
6.1	ARTIGOS E PARTICIPAÇÃO EM EVENTOS	87
6.1.1	Publicações e/ou Eventos 2016	87
6.1.2	Publicações e/ou Eventos 2017	88
6.1.3	Publicações e/ou Eventos 2018	88
6.2	TRABALHOS FUTUROS	88
	REFERÊNCIAS	90

1 INTRODUÇÃO

O fornecimento crescente de serviços de Tecnologia da Informação (TI) demanda cada vez mais por capacidade computacional, tipicamente fornecida por *Data Centers* (DCs). Independente do número de equipamentos compondo um DC (pequeno, médio ou grande porte), o gerenciamento energético é um desafio recorrente. Pesquisas indicam que aproximadamente 1,3% de toda a energia elétrica globalmente gerada é consumida por DCs (SONG; ZHANG; ERIKSSON, 2015; AHUJA et al., 2011). Esse valor é composto, principalmente, por dois elementos: infraestrutura de TI, representando 52%, e sistemas de suporte, constituindo 48%. Dentre os componentes dos sistemas de suporte, a climatização corresponde a aproximadamente 39%, possuindo impacto direto nos custos de manutenção (SONG; ZHANG; ERIKSSON, 2015).

Além de quantificar o consumo energético por categoria, determinar uma métrica que considere a relação entre os componentes de um DC, é essencial para quantificar a eficiência energética destes ambientes. O consórcio *Green Grid*¹ estabeleceu métricas e políticas tanto para reduzir o consumo energético quanto para aumentar a eficiência energética. A métrica *Power Usage Effectiveness (PUE)* é uma referência neste contexto e pode ser obtida pela razão entre o consumo total do DC e o consumo total dos equipamentos de TI. Quanto menor for o PUE, mais eficiente é o DC (AVELAR; AZEVEDO; FRENCH, 2012). Recentemente, DCs de grande porte divulgaram valores das suas médias trimestrais de PUEs, (ex. Google e Facebook) informaram 1,10 e 1,07, respectivamente, como melhores casos (HORNER; AZEVEDO, 2016). Por outro lado, a média mundial em 2014 foi de aproximadamente 1,7 (SVERDLIK, 2014).

O consumo de energia dos equipamentos de TI e sistemas de suporte podem variar, segundo as condições de temperatura do ambiente, afetando o grau de eficiência do DC mensurado pelo PUE. Um dos componentes do sistema de suporte mais afetado com a variação de temperatura do ambiente é o sistema de refrigeração. No que se refere a temperatura externa, algumas organizações decidiram implantar seus DC em regiões com temperaturas médias anuais inferiores as médias globais, embora estes ambientes fiquem geograficamente distantes de seus clientes (GOOGLE, 2012) (FACEBOOK, 2017).

A preocupação com a eficiência enérgica em DCs é pauta de fabricantes de equipamentos de TI, de desenvolvedores e de administradores de DC (SONG et al.,

¹ <https://www.thegreengrid.org/>

2017). Nesta última década, pode-se acompanhar a popularização das *Graphics Processing Unit* (GPU)s, a disseminação da virtualização, a disponibilização de monitores de recursos complexos, entre outros. Estas inovações possibilitam incrementar a eficiência energética dos equipamentos de TI, através da disponibilização de poder computacional com menor consumo de energia por processador (GPU), do melhor aproveitamento no uso dos recursos (virtualização) e/ou observação do comportamento das aplicações e adequações (monitoração).

A temperatura interna de DCs sofre influência de diversos fatores, tais como: localização geográfica, o projeto de sistema de refrigeração, a localização física dos equipamentos de processamento e de rede, ou ainda da carga de trabalho dos equipamentos de TI em geral (MALIK et al., 2017). DCs de grande porte, em sua maioria, são climatizados por *Computer Room Air Conditioner* (CRAC), sendo o ar frio injetado através de piso elevado perfurado, conduzido por dentro de *racks* de servidores (principal fonte geradora de calor em um DC) e exaurido pela parte superior. O controle do fluxo de ar frio direcionado, às fontes de geração de calor, torna o modelo CRAC eficiente (ARGHODE; JOSHI, 2013). Entretanto, CRACs exigem um elevado custo de implantação, se comparados com sistemas de refrigeração com condicionadores tradicionais (Split). Deste modo, o custo de implementação é um dos principais fatores para baixa adoção de CRAC em DCs de pequeno e médio porte. No Brasil, apenas 8% dos DCs utilizam CRAC (SCHNEIDER, 2014).

Neste trabalho, DCs constituídos de sistemas de refrigeração formados por condicionadores de ar e poucos pontos de injeção de ar, se comparado com CRAC que possui algumas dezenas de entradas/saídas direcionadas e projeto de condução pressurizada das correntes de ar frio e quente, são nomeados de *não-CRAC*. Sistemas de refrigeração *não-CRAC*, maioria dos DCs brasileiros, são mais suscetíveis a má distribuição das correntes de ar e a formação de zonas térmicas indesejáveis, não respeitando as normas de padronização (ASHRAE, 2016) (FULPAGARE; SHIRBHATE; BHARGAV, 2016).

Alguns fatores que podem influenciar na formação de zonas térmicas quentes que excedam as especificadas nas normas, são: a má distribuição físicas dos equipamentos de TI, a ausência de condução das correntes de ar frio / quente ou a variação da carga de processamento dos equipamentos. Os dois primeiros fatores referem-se ao projeto físico de concepção do DC, são fatores estáticos, pois o administrador não costuma deslocar seus servidores após a instalação física e tampouco direcionar as aletas do condicionador de ar de acordo com a carga do DC. O último fator, variação da carga de processamento, pode ser considerado pelo administrador no momento de provisionamento de recursos ou balanceamento de carga. Neste caso, o administrador define o servidor hospedeiro de acordo com a necessidade de processamento solici-

tada e a distribuição térmica atual entre as zonas. Portanto, ao provisionar um novo recurso, ele pode escolher um servidor X , localizado em uma zona Y , em detrimento a um servidor W , de igual poder computacional, localizado em uma zona Z , pelo fato da zona Z ter temperatura mais elevada do que a zona Y . Desta forma o equilíbrio térmico do DC é mantido.

O monitoramento térmico *on-line* é uma importante ferramenta para auxiliar a tomada de decisão do administrador do DC (LEVY; HALLSTROM, 2017b; SASA-KURA; AOKI; WATANABE, 2017). Sistemas de monitoramento são comuns em ambientes de DC de grande porte, com sistemas de refrigeração CRAC (VODEL; RITTER, 2017; LEVY; HALLSTROM, 2017b; SONG et al., 2017; LEVY; HALLSTROM, 2017a) e, menos frequentes, em DCs de pequeno e médio porte. A arquitetura Monitoramento Térmico de Data Centers (MonTerDC) tem como foco de atuação ambientes de DC de pequeno e médio porte, sem sistemas de refrigeração complexos, com restrições orçamentárias. Muitas vezes, estes ambientes são implantados em locais adaptados e sem projetos físico, lógico ou de refrigeração próprios. Este é o contexto de aplicação da Arquitetura MonTerDC, proposta deste trabalho, que caracteriza-se por ser modular e possibilitar a integração com ambientes de gerenciamento de nuvem. As principais motivações desta proposta são: (i) mapear o comportamento térmico dinâmico de um ambiente de DC, possibilitando a visualização e identificação de zonas térmicas indesejáveis (fora das normas); e (ii) vincular a movimentação térmica dinâmica de um DC ao consumo de energia dos equipamentos que o compõem.

Os resultados da monitoração das zonas térmicas em DC, de pequeno e médio porte e uma única fonte de ar frio, permitem quantificar o impacto do provisioramento de recursos na formação de zonas térmicas indesejáveis. Com o equilíbrio térmico no ambiente, o sistema de refrigeração é menos exigido e, consequentemente, o consumo energético total do DC é reduzido.

1.1 OBJETIVOS

Neste cenário, permitir o monitoramento de um ambiente de DC pode gerar impacto em diversos aspectos como, por exemplo, eficiência energética, melhoria no fluxo de refrigeração, aumento do desempenho de servidores e, consequentemente aumento da vida útil dos equipamentos.

Sendo assim, o principal objetivo deste trabalho é propor uma Arquitetura de Monitoramento Térmico (MonTerDC), para ambiente de DCs *não-CRAC* de pequeno e médio porte, apoiado no sensoriamento *Internet of Things* (IoT) e software de Simulação *Computational Fluid Dynamics* (CFD). A arquitetura permitirá ao administrador integrar a solução de monitoramento com o sistema gerenciador de nuvem utilizado

através de API's de integração ou visualizar o ambiente 3D *on-line*.

1.2 METODOLOGIA E CONTRIBUIÇÕES

Para o desenvolvimento da arquitetura, ambientes de DC de pequeno e médio porte foram avaliados, com objetivo de identificar a necessidade e aplicação da proposta em diversos cenários, de acordo com as necessidades de cada infraestrutura. O modelo de implantação dos sensores, quantidade, localização e forma de coleta de dados são apresentados no trabalho para facilitar a execução deste projeto pelos interessados. Para validação, foram executados experimentos em um ambiente real e apresentados os resultados e comparações.

O modelo de projeto da arquitetura MonTerDC permite que, através da documentação desenvolvida, qualquer administrador de DC consiga implementar a solução proposta. O sistema modular utilizado na arquitetura também permite que apenas os módulos de interesse para aquele ambiente sejam implantados e monitorados, permitindo assim atender um número maior de administradores e de DCs. Além disso, através da *Application Programming Interface* (API) de integração, o administrador ou desenvolvedor consegue, de maneira transparente, integrar o MonTerDC a gerenciadores de nuvem.

1.3 ORGANIZAÇÃO DO TEXTO

Este trabalho está organizado em 6 Capítulos. No Capítulo 2 é apresentada a revisão da literatura, conceitos de: (i) DCs, suas classificações e normas, sistemas de refrigeração, eficiência e TI verde; e (ii) Computação em nuvem, seus modelos de serviços e tipos de virtualização, finalizando com uma breve comparação entre alguns sistemas gerenciadores de nuvem.

No Capítulo 3, o texto está focado em aspectos específicos sobre monitoramento térmico em DCs. São discutidos sistemas de refrigeração *Computer Room Air Conditioner* (CRAC), softwares de simulação *Computational Fluid Dynamics* (CFD) e sensoriamento com *Internet of Things* (IoT). A proposta deste trabalho encontra-se no Capítulo 4. Neste Capítulo, tem-se a definição do problema, seguida pelo projeto de implantação de sensores e especificação de requisitos. O ponto alto do capítulo é a especificação da Arquitetura de Monitoramento Térmico de DC (MonTerDC) e do Protótipo MonTerDC.

Finalmente, os dois últimos capítulos apresentam os resultados obtidos e considerações finais. No Capítulo 5 é possível entender o ambiente de testes, a elaboração da Maquete do DC *Laboratório de Processamento Paralelo e Distribuído* (LabP2D) e o porquê da sua construção, a descrição dos experimentos e os resultados propria-

mente dito. Os resultados estão organizados em análise visual de zoneamento térmico e impacto energético decorrente da formação de zonas térmicas. Todos os capítulos centrais (de 2 à 5) têm uma seção de considerações parciais. O Capítulo 6 encerra o texto com as considerações finais, lista de publicações e de participação em eventos decorrentes da proposta de trabalho e, finalmente, com as descrições de possíveis pontos a serem explorados em trabalhos futuros.

2 REVISÃO DA LITERATURA

Como consequência do aumento de recursos computacionais, a necessidade de melhorar a gestão destes recursos de Tecnologia da Informação (TI) convergiram na adoção de soluções complexas e concentradas em ambientes de *Data Center* (DC). Softwares gerenciadores de nuvem, virtualização e normas ou técnicas de otimização de recursos são amplamente utilizadas em ambientes de DC. Este capítulo discorre sobre a revisão da literatura sobre DC, suas classificações e normas, como revisão para definição de um norte em relação ao gerenciamento de recursos computacionais. No contexto de computação em nuvem, a revisão aborda seus modelos de serviços, a virtualização e sistemas de gerenciamento integrados que permitem a gestão da infraestrutura pelo administrador.

2.1 DATA CENTER

A crescente demanda por poder computacional devido aos avanços das tecnologias de aquisição e processamento de dados, seguido pela explosão do volume de dados armazenados e a expansão da conectividade são desafios das empresas e pesquisadores da tecnologia da informação. As aplicações científicas sempre precisaram de constante crescimento dos recursos computacionais. Entretanto, nos últimos anos tornou-se necessário uma interdependência entre as áreas de software e infraestrutura.

Para isso, os recursos computacionais que crescem exponencialmente, precisam ser gerenciados e organizados de maneira otimizada, garantindo o melhor desempenho computacional com o menor custo. Adiciona-se a isso a globalização, distribuição geográfica e aumento na velocidade de comunicação de dados. Para atender essa demanda, foram desenvolvidas tecnologias como computação em aglomerado, computação em grade e computação e armazenamento de dados em nuvem (LANDI et al., 2018).

Um DC é uma estrutura física, utilizada para armazenar diversos recursos computacionais, como servidores, equipamentos de rede, soluções de armazenamento de dados e garantindo a comunicação entre eles. Esta estrutura deve estar preparada para garantir escalabilidade, segurança e redundância, com objetivo de manter a continuidade dos serviços prestados (LEVY; HALLSTROM, 2017a; CHEN et al., 2014).

Também pode-se classificar os DC em três modelos, de acordo com a forma de utilização e comercialização dos serviços: *Enterprise*, *Internet* e *Collocation*. O

modelo *Enterprise* tem como objetivo atender um único cliente ou organização. O modelo *Internet* provê recursos do tipo *Infrastructure as a Service* (IaaS), *Software as a Service* (SaaS), *Platform as a Service* (PaaS) entre outros. O *Collocation* entrega a infraestrutura para o cliente, como rede de dados, elétrica, ar condicionado e segurança, porém, equipamentos como servidores e periféricos são de propriedade do cliente. Embora existam diferenças significativas entre os três modelos de DC, todos podem coexistir dentro de um mesmo espaço físico (CHEN et al., 2014).

Com o uso de recursos computacionais fazendo parte constante do dia-a-dia das organizações, manter um DC operacional é essencial as organizações. Disponibilidade, confiabilidade e eficiência energética são fatores importantes a serem avaliados no projeto e implementação de uma infraestrutura de DC. Em ambientes de missão crítica, se torna necessário e imprescindível para a continuidade do negócio, independente do ramo de atuação. Seguir as normas técnicas de ambientes de DC e fabricantes de equipamentos é primordial para atingir o nível desejado de eficiência. Neste sentido, normas como a ANSI/EIA/TIA942 são parte importante na concepção do projeto e desenvolvimento de um DC.

2.1.1 Classificações e Normas

Dispor de infraestruturas operacionais confiáveis são fatores essenciais na escolha da locação de um DC. A esta escolha, as organizações associam níveis de disponibilidade, desempenho e custos. Todos estes fatores estão vinculados as boas práticas de implantação de equipamentos e a padronização da instalação. Esta padronização está alinhada a normas, que determinam a forma correta da implantação bem como valores indicados como aceitáveis de possíveis erros. Em ambientes de DC, destacam-se duas organizações de classificações e normas:

- O *Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos* (IEEE) que é responsável pela criação, aprovação e divulgação de normas técnicas que são implementadas nas áreas de engenharia elétrica, informática, padrões de redes sem fio, rede cabeada, formatos de códigos, entre outras atribuições.
- *Uptime Institute* que é uma organização criada em 1993 com foco em promover o aumento da confiabilidade e disponibilidade de DCs.

Entre as suas contribuições, destacam-se a criação da classificação de DCs em camadas (TIERS), originando a norma TIA-942. Esta classificação, em camadas de acordo com a norma, possibilita comparações de estimativas de custos e de desempenho entre diferentes projetos de implantação de DCs.

2.1.1.1 ANSI/EIA/TIA942

A norma ANSI/EIA/TIA942 (TIA-942, 2005) define a classificação de DC em quatro níveis independentes, chamados de *TIERS*. Os *TIERS* abrangem os aspectos de: (i) arquitetura e estrutura, (ii) telecomunicações, (iii) elétrico, (iv) mecânico e (v) redundância. Assim, para ser classificado em um determinado *TIER*, a infraestrutura deve atender todos os requisitos especificados.

Os principais componentes da arquitetura, segundo a norma (TIA-942, 2005), são: *Entrance Room* (ER), *Main Distribution Area* (MDA), *Horizontal Distribution Area* (HDA), *Zone Distribution Area* (ZDA) e *Equipment Distribution Area* (EDA).

- O ER é a região de interconexão entre o cabeamento estruturado do DC e o cabeamento dos provedores de telecomunicação externos.
- O MDA é a área onde localiza-se a conexão central do DC que distribui o cabeamento estruturado, através dos roteadores.
- A área de conexão com os equipamentos (HDA), inclui a conexão horizontal e equipamentos intermediários como *switches*.
- O ponto de interconexão opcional (ZDA) localiza-se entre o HDA e EDA e provê maior flexibilidade a estrutura.
- Finalmente, o EDA é a área reservada para os servidores de computação, de armazenamento, assim como, os equipamentos de redes alocados em gabinetes e *racks*.

A certificação do coeficiente geral do DC (*TIER* do DC) é obtida pelo coeficiente de menor valor entre os seus subsistemas, o que torna essencial a preocupação com todos os componentes da arquitetura. Dentre os fatores para garantir o funcionamento correto do DC, estão os limiares mínimos e máximos de temperatura. Embora todos os componentes envolvidos na norma estejam suscetíveis a impactos térmicos decorrentes da utilização, a EDA é a área com maior dissipação de calor e variação de temperatura. Esta característica tem impacto no funcionamento do sistema de refrigeração e, consequente, alteração de consumo de energia.

DCs recebem suas classificações de acordo com a sua disponibilidade de operação e de redundância. A classificação *TIER-1* não possui sistemas redundantes nem de energia nem de refrigeração, sendo que podem ser previstas paradas no ambiente para serviços de manutenção (máximo de 28.8h/ano). Na classificação *TIER-2*, os DCs passam a possuir componentes redundantes em sua estrutura, tais como

conexões Internet, módulos de energia, armazenamentos e comunicação interna. O *downtime* anual do modelo *TIER-2* é de no máximo 22h/ano.

Na categoria *TIER-3*, os DCs devem promover a manutenção sem paradas, ou seja, as operações de manutenção e de serviços são simultâneas. O *downtime* anual máximo para esta categoria é de 1.6h/ano, garantindo disponibilidade superior a 99.982%. Finalmente, para atingir a categoria *TIER-4*, os DCs devem prover redundância em todos os componentes da arquitetura. O *downtime* máximo aceito passa a 0.4h/ano.

2.1.1.2 ANSI/BICSI-002-2014

A norma BICSI-002-2014 (BICSI-002, 2014) é responsável pela definição de padrões de *design* e *layout* para DCs. Fornece requisitos, diretrizes e melhores práticas a serem aplicadas em qualquer infraestrutura. Destina-se, principalmente, a proprietários e operadores de DC, consultores e gerentes de projetos de telecomunicações e TI e instaladores de tecnologia de telecomunicações. A norma define informações e boas práticas relacionados a:

- Estrutura física de DCs;
- DC modulares e containerizados;
- DCIM (*Data Center Infrastructure Management*) e sistemas de construção;
- Corredores quentes e frios;
- Arquitetura de múltiplos DCs;
- Terceirização de serviços de DC; e
- Eficiência energética.

A especificação da norma BICSI-002-2014 dedica-se ao projeto físico de DCs. Ela determina práticas para garantir a melhor eficiência do uso dos recursos, especificando padrões para implantação de DCs. Aspectos relacionados a condição climática da região também são considerados. Temperaturas médias anuais, velocidade de ventos, qualidade do ar, queimadas, áreas vulcânicas, entre outros aspectos naturais são relacionados ao desempenho dos sistemas do DC. No contexto deste trabalho, os vínculos com a norma são: as definições da estrutura física, a especificação de projeto de corredores quentes e frios, e eficiência energética. Embora importantes, as demais especificações não são tratadas neste trabalho.

2.1.1.3 ASHRAE

No que se refere especificamente a climatização e eficiência energética para DCs, a organização responsável é a *American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers* (ASHRAE). ASHRAE desenvolveu e publicou normas, atualmente vigentes, para estes fatores em DCs (ASHRAE, 2016). São elas:

- *ANSI/ASHRAE Standard 90.4-2016, Energy Standard for Data Centers*; e
- *ANSI/ASHRAE Standard TC9.9, Datacenter Networking Equipment – Issues and Best Practices*.

A norma ASHRAE 90.4, que trata de padrões de energia para DCs, estabelece os requisitos mínimos de eficiência energética para projeto e construção de DCs. Ela especifica práticas de criação, planos de operação e de manutenção e definições para a utilização de energia renovável, obtidas tanto no local de implantação quanto fora. O padrão 90.4 ainda aborda os requisitos de energia de ambientes de DC, baseando-se no desempenho oferecido pelos componentes de projeto para carga mecânica (MLC) e perda elétrica (ELC). Os requisitos de ambientes são regionalizados. Para enquadrar-se na norma, um DC deve comparar os seus resultados do MLC e ELC aos padrões regionais. Os valores máximos permitidos são especificados de acordo com as zonas climáticas globais. As definições desta norma são gerais e com foco a totalidade do ambiente de DC, sobretudo com os limiares externos ao DC.

A norma ASHRAE TC 9.9 é complementar a ASHRAE 90.4, preocupando-se com aspectos relacionados a instalações de missão crítica, espaços de tecnologia e equipamentos bem como sistemas eletrônicos internos ao DC. Ela especifica padrões para centros de dados, salas, armários de computadores, salas de servidores, ambientes de piso elevado, cargas de alta densidade, centros de operações de rede de emergência, instalações de telecomunicações, salas de comunicação, armários e equipamentos eletrônicos. Define e recomenda faixas (mínimas e máximas) de temperatura, de umidade e de altitude, isso, de acordo com as classificações para DCs determinadas pela própria organização (Tabela 1).

De acordo com a norma ASHRAE TC9.9, os DCs são classificados em seis classes, nomeadas de *A1* à *A4*, *B* e *C*. Na classe *A1*, por exemplo, a temperatura pode variar entre 17° C e 27° C, respeitando a taxa de variação máxima de 5° C em 20 horas de funcionamento. A maior variação da norma diz respeito a temperatura de operação, de 17° C na classe *A1* e de 28° C na classe *C*. Com relação a temperatura máxima, as classes *A* (*A1* a *A4*), todas possuem máximo de 27° C. Quanto a altitude máxima, todas as classes devem estar abaixo dos 3050m de altitude.

Tabela 1 – Especificação de Equipamentos da Norma ASHRAE TC9.9

Classes	Especificações Ambientais dos Equipamentos							
	Operação				Desligamento			
Temp. Ar (°C)	Umidade	Cond. Máx. (°C)	Altitude Máx. (m)	Taxa de Mudança (°C/h)	Temp. Ar (°C)	Umidade Relativa	Cond. Máx. (°C)	
Recomendado								
A1 a A4	18 à 27							
Aceitável								
A1	15 à 32	20% à 80% RH	17	3050	5/20	5 à 45	8 à 80	27
A2	10 à 35	20% à 80% RH	21	3050	5/20	5 à 45	8 à 80	27
A3	5 à 40	8% à 85% RH	24	3050	5/20	5 à 45	8 à 85	27
A4	5 à 45	8% à 90% RH	24	3050	5/20	5 à 45	8 à 90	27
B	5 à 35	8% à 80% RH	28	3050	-	5 à 45	8 à 80	29
C	5 à 40	8% à 80% RH	28	3050	-	5 à 45	8 à 80	29

Fonte: ASHRAE TC9.9 (2016)

2.1.2 Sistemas de Refrigeração

O estudo das normas evidencia a preocupação das organizações para definição de limiares e boas práticas no projeto e implantação de DCs. Dentre os componentes que impactam sobre o funcionamento de DCs destacam-se os sistemas de refrigeração. Estes sistemas são responsáveis diretos pelos resultados de eficiência energética e influenciam nos critérios de temperatura, umidade e pressão dos ambientes de DC.

DCs de grande porte, em sua maioria, são climatizados por *Computer Room Air Conditioner* (CRAC), sendo o ar frio injetado através de piso elevado perfurado, conduzido por dentro de *racks* de servidores (principal fonte geradora de calor em um DC) e exaurido pela parte superior. O controle do fluxo de ar frio direcionado, às fontes de geração de calor, torna o modelo CRAC eficiente (ARGHODE; JOSHI, 2013). Pode-se observar algumas variações entre projetos de CRACs. Em sistemas de refrigeração de expansão direta, o evaporador fica dentro da sala, e o condensador, na parte externa. Em sistemas autocontidos, o evaporador e o condensador são instalados internamente.

Dentre os sistemas autocontidos, a refrigeração a Glycol (DAY, 2002) caracteriza-se por um sistema de troca de calor interno. Porém, o evaporador e o condensador deste sistema de refrigeração contam com o auxílio de uma torre de resfriamento instalada na parte externa ao ambiente de DC. Outra solução que apoia-se neste prin-

cípio de torre é a refrigeração a água. Neste caso, a função da torre de resfriamento é aplicada a água. Os *chillers* (EBRAHIMI; JONES; FLEISCHER, 2014), (CAPOZZOLI; PRIMICERI, 2015) são uma variação de sistemas autocontidos com resfriamento a água. Neste caso, a água é resfriada na torre externa e, através de uma estrutura de canos hidráulicos, interna ao ambiente de DC, ela circula. Em seu retorno a torre, a água, agora aquecida pelas fontes internas de calor do DC, é resfriada por um condensador. Então, o ciclo de refrigeração fechado e contínuo, recomeça. Independente do sistema de refrigeração CRAC escolhido, a sua implantação, sua manutenção e sua operação são complexas.

Além disso, CRACs exigem um elevado custo de implantação e manutenção, se comparados com sistemas de refrigeração com condicionadores tradicionais (e.g., *Split*). O custo de implantação de sistemas de refrigeração CRACs em DC é um dos principais fatores para baixa adoção de CRAC em DCs de pequeno e médio porte. No Brasil, apenas 8% dos DCs utilizam CRAC (SCHNEIDER, 2014). DCs constituídos de sistemas de refrigeração formados por condicionadores de ar tradicionais, são nomeados de *não-CRAC*. Sistemas de refrigeração *não-CRAC*, empregados na maioria dos DCs brasileiros, são mais suscetíveis a má distribuição das correntes de ar e a formação de zonas térmicas indesejáveis, não respeitando as normas de climatização de DC (ASHRAE, 2016; FULPAGARE; SHIRBHATE; BHARGAV, 2016).

A norma e os sistemas próprios para utilização em ambientes de DC visam uma maior eficiência do sistema de refrigeração e menor consumo de energia. Para atingir este objetivo, o projeto precisa considerar: tamanho da sala, densidade de carga em KW por gabinete, número de unidades evaporadoras, posição do ambiente de DC no edifício, possibilidade de expansão, modelo de redundância, clima local, entre outros. Além dos fatores já comentados, mais recentemente, empresas e governos vêm monitorando o impacto ambiental de DCs. Neste sentido, fatores ambientais também são considerados e associados diretamente a sistemas de refrigeração. Elementos como: quantidade de CO_2 produzida, tipo de fontes de energia e a possibilidade de usufruir de condições climáticas favoráveis, são avaliados na implantação de um projeto de DC associados a TI Verde (AVELAR; AZEVEDO; FRENCH, 2012).

2.1.3 Eficiência e TI Verde

A sustentabilidade é um conceito sistêmico relacionado a continuidade dos aspectos econômicos, sociais, culturais e ambientais da sociedade humana. No contexto de ambientes de DC, o consumo de energia para alimentar estes ambientes é fonte de preocupação para defensores de um mundo sustentável (PANDIKUMAR; KABILAN; AMALRAJ, 2012). Como o consumo de energia em DCs é elevado, faz-se necessário a identificação de alternativas para geração de energia renovável.

DCs de grandes fornecedores de serviços de TI da atualidade, tais como *Google, Apple, Microsoft* e *Yahoo*, que possuem níveis de eficiência classificados como "muito eficiente/eficiente", utilizam acima de 93% fontes de energia não renováveis (GARG; BUYYA, 2012). Outra frente de atuação é a utilização de técnicas e/ou equipamentos que permitam reduzir o consumo, sem perder em desempenho ou em poder de processamento (YUAN et al., 2017),(ZHANG et al., 2018),(BACCOUR et al., 2017).

Nesta última década, algumas iniciativas na área de sustentabilidade focada em eficiência energética passaram a ser associadas ao conceito de *Green Data Center* (GreenDC) (SHARMA et al., 2017),(LI et al., 2017). Como iniciativa organizacional, o *The Green Grid* foi criado para ser uma organização sem fins lucrativos, formada por profissionais de TI, com o objetivo de definir métricas para ambientes de DC referentes a consumo de energia e TI Verde (AVELAR; AZEVEDO; FRENCH, 2012). Definir critérios abrangentes e justos para quantificar a eficiência de um processador e/ou DC não é um tarefa trivial. Os principais parâmetros, mensuráveis e comparáveis, aceitos na comunidade científica são (JAIN et al., 2013):

- *Power Usage Effectiveness* (PUE): Métrica utilizada para comparar a quantidade de energia gasta entre equipamentos de TI e de infraestrutura em um DC. A faixa de classificação do PUE é de 1(muito eficiente) a 5(muito ineficiente).

$$PUE = \frac{\text{TotalEnergiaDC}}{\text{TotalEnergiaTI}} \quad (2.1)$$

- *Data Center Infrastructure Efficiency* (DCiE): Baseia-se no PUE e também é utilizado para comparar eficiência de ambientes de DC.

$$DCiE = \frac{1}{PUE} \quad (2.2)$$

- *Performance per Watt*: Quantifica a eficiência energética de uma arquitetura individual de equipamentos de TI. O consumo do processador, em Watt, é associado ao trabalho desenvolvido pelo processador, em FLOPS (*Floating-point Operations per Second*) ou MIPS (*Millions Instructions per Second*)
- *Compute Power Efficiency* (CPE): Medida da eficiência de computação de um DC. Esta medida busca associar a taxa de utilização dos equipamentos a eficiência do DC.

$$CPE = \frac{\text{TaxaUtilizacaoEquipamentosTI}}{PUE} \quad (2.3)$$

- *Green Energy Coefficient* (GEC): Quantifica a proporção de energia verde (renewável) em relação ao total de energia consumida no DC.

$$GEC = \frac{\text{EnergiaVerdeConsumida}}{\text{TotalEnergiaConsumida}} \quad (2.4)$$

- *Energy Reuse Factor* (ERF): Quantifica a proporção de energia reutilizável em relação ao total de energia consumida no DC.

$$ERF = \frac{EnergiaDeReuso}{TotalEnergiaConsumida} \quad (2.5)$$

- *Carbon Usage Effectiveness* (CUE): Quantifica a emissão de CO^2 do ambiente de DC em função da energia consumida pelos equipamentos de TI.

$$CUE = \frac{EnergiaCO_2}{EnergiaTI} \quad (2.6)$$

- *Water Usage Effectiveness* (WUE): Quantifica a proporção entre o volume de água utilizada pelo DC anualmente e o consumo de energia dos equipamentos de TI.

$$WUE = \frac{AguaConsumidaAnualmente}{EnergiaTI} \quad (2.7)$$

- *Data Center Productivity* (DCP): Quantifica a proporção entre trabalhos efetuados e total de recursos necessários para execução destes trabalhos.

$$DCP = \frac{TrabalhosEfetuados}{TotalRecursosUtilizados} \quad (2.8)$$

- *Data Center Energy Productivity* (DCEP): Quantifica a proporção entre trabalhos efetuados e total de energia consumida.

$$DCeP = \frac{TrabalhosEfetuados}{TotalEnergia} \quad (2.9)$$

Pode-se observar que o consumo de energia está presente, direta ou indiretamente, em praticamente todas as métricas estudadas. Além disso, a eficiência do consumo de energia está relacionada com a produção final do DC, ou seja, consumo de energia dos equipamentos de TI. No entanto, o consumo de energia dos recursos secundários (infraestrutura), tais como sistemas de refrigeração, impactam no consumo total do DC, na manutenibilidade dos equipamentos de TI e na vida útil dos equipamentos. Dentre as definições formalizadas por esta organização, destaca-se o PUE, consolidado na indústria. A *Google* e *Facebook* publicam o PUE de seus DCs *online*. De acordo com dados disponibilizados em Junho de 2018¹, o DC da *Google* obteve em 2017 PUE = 1.11 e o *Facebook* informava, no momento da consulta, o PUE instantâneo de 1.06. O *FaceBook* ainda disponibiliza *WUE*, umidade e temperatura.

¹ URL da *Google* <<https://www.google.com/about/datacenters/efficiency/internal/>>; e URL do *FaceBook* <<https://www.facebook.com/PrinevilleDataCenter/app/399244020173259>>

2.2 COMPUTAÇÃO EM NUVEM

A computação em nuvem (*Cloud Computing*) tem como objetivo permitir escalabilidade e elasticidade do uso de recursos, através de um modelo baseado em serviços, contratados sob demanda, e que permitam a medição e mensuração de uso. A centralização das informações em grandes DCs motivou as empresas a repensarem a forma de investir em TI, migrando os dados da sua infraestrutura local para a nuvem (KHAJEH-HOSSEINI; SOMMERVILLE; SRIRAM, 2010),(LOW; CHEN; WU, 2011). Clientes de nuvem podem reduzir custos operacionais, tais como investimentos em infraestrutura, consumo de energia e licenciamento de software. Além disso, podem adequar suas necessidades sazonais de recursos, incrementando ou reduzindo seus contratos de utilização de acordo com suas demandas (MARSTON et al., 2011).

Comparada as grades computacionais, a computação em nuvem apresenta melhorias no formato de entrega de recursos, através de serviços, que permitem orquestrar recursos utilizando virtualização, através de interfaces amigáveis focadas diretamente em usuários finais (MELL; GRANCE, 2011),(KEIVANI; GHAYOOR; TAPAMO, 2018). Esse modelo de serviço é dependente da contabilização e do monitoramento dos recursos vinculados à clientes.

2.2.1 Modelos de Serviços

Para atender a demanda de empresas e os diferentes cenários de utilização de uma nuvem computacional, foram definidos quatro modelos de implantação: nuvem privada, nuvem pública, nuvem híbrida e nuvem comunitária (MELL; GRANCE, 2011). Nuvens públicas são disponibilizadas publicamente através de modelos *pay-as-you-use* (BEGUM; KHAN, 2011) ou *pay-as-you-go* (RAHIMI et al., 2014). A adoção deste modelo ocorre devido ao baixo custo de manutenção e gerenciamento, se comparada a uma nuvem privada. Modelos de serviços de nuvem são independentes do modelo de implantação. Os principais modelos de serviços oferecidos são (MELL; GRANCE, 2011):

- Infraestrutura como Serviço (IaaS – *Infrastructure as a Service*): Como pode ser observado na Figura 1, o modelo IaaS oferece ao cliente o controle total do Sistema Operacional, Middleware, Runtime, Dados e Aplicativos. Cabe ao provedor o controle do hardware e o fornecimento do serviço de virtualização.
- Plataforma como Serviço (PaaS – *Platform as a Service*): No modelo PaaS, o Sistema Operacional deixa de ser responsabilidade do cliente e passa para o controle do provedor.

- Software como Serviço (SaaS – *Software as a Service*): Finalmente, no SaaS o controle total das camadas Aplicativos, Dados, Runtime, Middleware, Sistema Operacional, Virtualização e Hardware é do provedor do serviço. O cliente restringe-se a utilização do produto (aplicativo) desejado, por exemplo, uma planilha de cálculos ou editor de texto.

Figura 1 – Modelo de Serviços

APLICATIVOS	APLICATIVOS	APLICATIVOS	APLICATIVOS
DADOS	DADOS	DADOS	DADOS
RUNTIME	RUNTIME	RUNTIME	RUNTIME
MIDDLEWARE	MIDDLEWARE	MIDDLEWARE	MIDDLEWARE
SO	SO	SO	SO
VIRTUALIZAÇÃO	VIRTUALIZAÇÃO	VIRTUALIZAÇÃO	VIRTUALIZAÇÃO
HARDWARE	HARDWARE	HARDWARE	HARDWARE
Cliente	IaaS	PaaS	SaaS

Fonte: Adaptado de (KAVIS, 2014)

Como pode ser observado na Figura 1, comum em todos os modelos, a virtualização é um dos elementos da arquitetura de nuvem que permite que sejam atendidos os requisitos de elasticidade, escalabilidade e compartilhamento de recursos. Através da virtualização, um mesmo recurso físico pode ser compartilhado com diversos serviços providos pela nuvem.

2.2.2 Tipos de Virtualização

A virtualização é essencial a aplicação do modelo de nuvem computacional. Ela é responsável pela gerência e compartilhamento dos recursos físicos viabilizando o uso isolado destes recursos por diferentes ambientes. O isolamento dos ambientes de testes, desenvolvimento e produção, em máquinas virtuais ou contêiners permitiram a concepção de novos negócios (KHAN et al., 2018). O emprego de virtualização

em ambientes de DC melhora o uso dos recursos físicos. A virtualização pode ser de duas formas (VELTE et al., 2012):

- Para-virtualizada: todos os componentes são virtualizados, as requisições ao hardware são feitas pelo sistema gerenciador de virtualização (hipervisor).
- Completa: fornece ao sistema virtualizado uma réplica do hardware (BIOS, *drivers*) e os demais recursos são emulados (hipervisor).

Cabe ao hipervisor receber as solicitações dos ambientes virtualizados e gerenciar os recursos físicos entre estes ambientes. Ele é o responsável pelo escalonamento dos ambientes virtualizados (KAKAKHEL et al., 2018). O hipervisor permite a fragmentação do hardware físico criando uma camada de abstração entre o hardware e o software. O software protege o acesso aos recursos de infraestrutura e contabiliza o uso por usuário. A aplicação da virtualização em ambientes de DC flexibilizou o fornecimento de recursos entre os usuários, possibilitando, inclusive a movimentação de máquina virtuais entre recursos físicos. A movimentação de ambientes virtuais em um DC permite explorar aspectos físicos de localidade, por exemplo, melhor posição de um nó físico em relação a climatização.

2.2.3 Sistemas Gerenciadores de Nuvem

A orquestração dos recursos físicos providos pelo ambiente de DC e dos serviços de nuvem, independente do modelo de serviço, são de responsabilidade dos gerenciadores de nuvem. Entre os principais serviços gerenciados pelos gerenciadores de nuvem estão: virtualização, armazenamento, integração, monitoramento, redes e gerenciamento de energia (MANVI; SHYAM, 2014),(RIMAL; CHOI; LUMB, 2009). Atualmente, existem várias alternativas de gerenciadores de nuvem, neste contexto, destacam-se quatro: OpenStack, CloudStack, OpenNebula e Eucalyptus.

2.2.3.1 OpenStack

O OpenStack é uma ferramenta *open source*, suportada pela comunidade e, financiada e utilizada, por grandes empresas. Entre os principais investidores, pode-se citar *IBM*, *RedHat* e *HP*, já como clientes, ressalta-se *PayPal* e *OverStock*. É reconhecido pelo seu alto nível de flexibilidade e customização, contando com uma API completa para associação de serviços e comunicação entre serviços. Ele está atualmente na sua 17^a versão, identificada pelo codinome "Queens". Os principais serviços do OpenStack são: *Dashboard* (*Horizon*), Computação (*Nova*), Rede (*Neutron*), Armazenamento de objeto (*Swift*), Armazenamento de bloco para VM (*Cinder*), Identificação (*Keystone*), Imagem de VM (*Glance*) e Telemetria (*Ceilometer*) (OPENSTACK, 2018).

O módulo de monitoramento, Ceilometer, permite gerenciar e monitorar os equipamentos físicos e virtuais. Entre as métricas presentes, desataca-se a *power*, que diz respeito a consumo de energia (LEIRIA; DRUMM; FERRETO, 2017).

2.2.3.2 *CloudStack*

O Apache CloudStack é um projeto da *Apache Software Foundation* (ASF), que o desenvolve e o mantém *open source*. Atualmente, ele suporta somente nuvens do tipo IaaS, públicas ou privadas, através de uma plataforma de orquestração de nuvens aberta e flexível. Sua arquitetura é monolítica, internamente fragmentada em regiões, zonas, *pods*, grades, hospedeiros e armazenamento (primário e secundário). Baseado em Java, o projeto CloudStack suporta *XenServer*, *KVM*, *Hyper-V* e *VMWare ESXi*, e fornece API nativa de acesso compatível com os serviços da *Amazon S3/EC2* (CLOUDSTACK, 2018). A ferramenta de monitoramento presente no sistema preocupa-se, principalmente, com a gestão dos recursos computacionais como armazenamento, memória e conexão.

2.2.3.3 *OpenNebula*

O OpenNebula é um conjunto de ferramentas *open source*, simples e flexíveis, que permitem o gerenciamento de nuvens IaaS, privadas, públicas ou híbridas. Possui arquitetura monolítica, internamente divida em dois módulos: *Virtualization Management*, que oferece os serviços de gerenciamento da virtualização do DC, tanto de computação quanto de armazenamento; e *Cloud Management*, que fornece possibilidade de provisionamento dos recursos e gerenciamento da infraestrutura. Seu sub-sistema de monitoramento permite coletar informações de *hosts* e máquinas virtuais. Pode-se receber informações referentes a *status*, performance e consumo de diversos sensores que são processados, armazenados e exibidos ao administrador (OPENNEBULA, 2018).

2.2.3.4 *Eucalyptus*

O Eucalyptus possui licenciamento *open source* e está sob o domínio da *Eucalyptus Systems Inc.* Disponível para Linux, permite a criação e o gerenciamento de nuvens, tanto privadas quanto híbridas e, possui interface compatível com a *Amazon EC2*. O gerenciador de instâncias controla a execução, inspeção e finalização de máquinas virtuais. O gerenciador de grupo coleta informações sobre as instâncias, controla a execução em um hospedeiro e gerencia a rede virtual. Por fim, o gerenciador de nuvem é o ponto de acesso para usuários e administradores, permitindo o monitoramento da utilização dos recursos (EUCALYPTUS, 2018). O módulo de monitoramento está em desenvolvimento e o status das funcionalidades pode ser acompanhado na

wiki da solução. As principais funções já desenvolvidas são relacionadas com monitoramento de recursos, como disco, memória e processos.

2.2.3.5 Comparação dos Gerenciadores de Nuvem

Apesar dos sistemas gerenciadores de nuvem terem o mesmo objetivo, prover um sistema de computação em nuvem de forma transparente para o usuário, eles diferem na forma de atingir seus objetivos. Na Tabela 2, ressalta-se as diferenças nos aspectos: forma de virtualização, tipo de sistema de armazenamento, possibilidade de integração, monitoramento, suporte a serviços de rede e gerenciamento de energia.

Tabela 2 – Comparação dos Gerenciadores de Cloud

Característica	OpenStack	CloudStack	OpenNebula	Eucalyptus
Virtualização	Xen, KVM e Hyper-V	Xen, KVM, VmWare	Xen, KVM, VmWare	Xen, KVM, VmWare
Armazenamento	AoE, iSCSI, NFS	iSCSI, NFS, RBD	NFS, iSCSI, LVM	AoE, iSCSI, NFS
Integração	EC2, S3	EC2, S3	EC2	EC2, S3, EBS
Monitoramento	Clanavi	VM Sync	Sunstone	Nagios
Redes	Vlan, VSwitch	Vlan	Bridge, Vlan, vSwitch	Bridge, Vlan
Ger. Energia	Power Management	-	CLUES	-

Fonte: O autor

Além dos aspectos objetivos descritos na Tabela 2, pode-se ainda destacar, o aspecto subjetivo que é a complexidade de implementação. OpenStack e CloudStack possuem maiores detalhes e etapas em sua instalação e configuração, enquanto o OpenNebula e Eucalyptus já entregam uma solução simplificada para instalação e configuração. No contexto deste trabalho, a possibilidade de integração com os serviços de monitoramento e a atuação no provisionamento nos recursos é essencial. A arquitetura modular e a facilidade de integração de novos serviços no OpenStack, tornam este sistema de gerenciamento de nuvem mais atrativo do que os demais no contexto deste trabalho.

2.3 CONSIDERAÇÕES PARCIAIS

A concentração dos equipamentos de TI em um ambiente único, denominado DC, se tornou uma realidade devido a necessidade de aumento de poder computacional. Este ambiente deve seguir as normas e aplicar as boas práticas para implementação e uso dos recursos. Dentre os elementos observados nas normas, este trabalho focou-se na variação de temperatura e sistemas de refrigeração em DC. Os sistemas de refrigeração em DC impactam diretamente no consumo de energia e são afetados pela variação de temperatura do ambiente. O consumo de energia é um componente

essencial nas métricas de TI Verde e eficiência energética, tema atual e em expansão nas comunidades acadêmicas e industriais.

Neste ecossistema surgiram as nuvens computacionais, flexíveis e escaláveis, utilizando de virtualização dos recursos, elas possibilitam o melhor uso dos recursos físicos. Dentre os gerenciadores de nuvem estudados, o OpenStack destacou-se por ter diversos apoiadores e com aplicação direta em empresas. Além disso, sua arquitetura é modular e permite comunicação com os serviços via API. O Ceilometer é o serviço de monitoração do OpenStack. A monitoração de ambientes de DC, berços de nuvens computacionais ou não, associada ao impacto térmico e ao consumo de energia é o tema deste trabalho.

3 MONITORAMENTO TÉRMICO EM DATA CENTER

O monitoramento de ambiente de *Data Centers* (DCs) é uma prática comum e essencial. Dentre os componentes mais monitorados estão a taxa de utilização dos recursos, tais como processadores, memórias e redes. No contexto de TI Verde, o consumo de energia é fator crucial para tomada de decisão de projeto, implantação e alocação de recursos em ambientes de DC. Um dos grandes consumidores de energia em um DC é o sistema de refrigeração que, por sua vez, é influenciado por correntes térmicas internas ao ambiente de DC. Neste capítulo são apresentados alguns trabalhos que monitoram o comportamento térmico em grandes DCs, refrigerados por *Computer Room Air Conditioner* (CRAC). Em seguida, são introduzidos os principais conceitos de *Internet of Things* (IoT) e *Computational Fluid Dynamics* (CFD), componentes de apoio para concepção da proposta de trabalho.

3.1 COMPUTER ROOM AIR CONDITIONER (CRAC)

O monitoramento térmico é uma prática reconhecida em DCs de grande porte, cujo sistema de refrigeração segue o modelo CRAC. A Tabela 3 apresenta a comparação entre os trabalhos relacionados. Dentre eles, as soluções diferem quanto ao objetivo, a aplicação e ao componente observado. Alguns trabalhos observam o comportamento do processador, do servidor, do *rack* ou da totalidade do DC.

Tabela 3 – Monitoramento térmico de ambientes de DC.

Autor	Nível	Coleta de dados	Aplicação	Objetivo
(TANG; GUPTA; VARSAMOPOULOS, 2008)	DC	modelo / CFD	simulação	circulação de ar
(PAKBAZNIA; GHASEMAZAR; PEDRAM, 2010)	DC	-	real	balanceamento de carga
(LEI; LIANG; LIU, 2011)	rack	sensor.	real	previsão
(AHUJA et al., 2011)	rack	CFD	simulação	contenção no rack
(ALKHARABSHEH et al., 2014)	DC	modelo / CFD	simulação	saída de ar quente
(BOTTARI, 2014)	DC	sensor.	real	previsão/prevenção
(WIBRON, 2015)	DC	CFD	simulação	localização física
(ZHANG et al., 2015)	DC	sensor.	real	pressão do ar
(GAO et al., 2016)	rack	-	real	fluxo de ar
(MARSHALL; BEMIS, 2011)	DC	CFD	simulação	fluxo de ar

No nível de atuação do monitoramento e refrigeração pode-se identificar soluções a nível de *rack* ou para o DC como um todo. (ASHRAE, 2016) abordam o

comportamento do fluxo de ar internamente ao *rack* através de experimento real, entretanto, não se preocupam como o posicionamento dos equipamentos e a localização interna afeta o aquecimento. (LEI; LIANG; LIU, 2011) fazem uma análise semelhante, utilizam sensores para realizar a predição de cenários em tempo real. Por outro lado, através de simulação, (AHUJA et al., 2011) analisam o fluxo do ar internamente ao *rack* utilizando CFD, porém não abordam as diferentes cargas de trabalho em diversos cenários.

A simulação através da Dinâmica dos Fluídos Computacionais, CFD é utilizada para prever as velocidades dos fluídos e suas respectivas temperaturas ou para modelar as correntes de ar frio/quente em ambientes de DC (MARSHALL; BEMIS, 2011; WIBRON, 2015). (AHUJA et al., 2011) indicam como utilizar o CFD para analisar um ambiente de DC de alta disponibilidade e identificar a diferença de temperatura quando é utilizado contenção nos *racks*, evitando que o ar quente recircule. Por sua vez, (TANG; GUPTA; VARSAMOPOULOS, 2008) apresentaram um modelo de circulação de ar para DC visando diminuir o custo com climatização, com resultados de economia entre 20% a 30% no consumo de energia. Entretanto, ambos não relacionaram as cargas de trabalho dinâmicas que ocorrem nestes ambientes de alto desempenho. De forma complementar, (ALKHARABSHEH et al., 2014) utilizaram CFD em um DC para predizer a temperatura de saída do ar quente para ajustar o sistema de refrigeração.

Analizando o método de coleta dos dados, quando observada a utilização de sensores, (LEI; LIANG; LIU, 2011), propuseram o ThermoCast, solução de monitoramento com sensores que realiza o mapeamento de zonas térmicas em *rack*, para identificar zonas de calor e predizer o superaquecimento individualizado na estrutura. Entretanto, uma visão macro do ambiente não é possível, atendo-se apenas ao nível de *rack*. Também utilizando sensores, (BOTTARI, 2014) apresenta uma arquitetura para monitoração de DCs através de IoT, com objetivo de identificar e prever o superaquecimento, porém, não se preocupando com as zonas de calor ou a influência entre elas.

Para gerenciar a temperatura do ar frio injetado, (ZHANG et al., 2015) apresentam um sistema para utilização em CRAC, que através da coleta de informações de temperatura e mapeamento de zonas, permite regular a quantidade de ar frio injetado no sistema em cada área. Ainda, (GAO et al., 2016) propõem uma unidade de refrigeração e circulação de ar individualizada para cada *rack* que permite a coleta do ar frio do sistema de ventilação CRAC e envio direto o *rack*, gerando um fluxo de ar frio específico para cada área.

Como alternativa para a redução do consumo de energia, pode-se realizar a migração de máquinas virtuais para outros servidores ou locais físicos. Em (PAKBAZ-

NIA; GHASEMAZAR; PEDRAM, 2010) o objetivo é a redução de energia através do balanceamento de carga, distribuindo processos entre vários servidores e mantendo a suas cargas equivalentes. A técnica utilizada por (ALKHARABSHEH et al., 2014) segue a lógica oposta, utiliza-se a consolidação de processos no menor número de servidores possível. Ambos convergem no ambiente de aplicação, DCs de produção e CRAC, entretanto, não se preocupam com as novas zonas térmicas originadas pelo balanceamento das cargas e variação da temperatura.

As zonas térmicas são utilizadas como base na concepção e modelagem térmica de instalações como prédios e DCs. São dinâmicas e podem ser agrupadas, compreendendo um ou mais espaços relacionados. Entretanto, o tratamento das informações deve levar em consideração a ocorrência de zonas combinadas, que devido a sua dinamicidade podem ocorrer em uma região, dividindo uma zona em várias ou agrupando em apenas uma (BROWN, 2012). Segundo (DOBS; HENCEY, 2012), a modelagem e eficiência térmica de prédios está diretamente ligada ao consumo de energia com refrigeração. Para identificar o fluxo de ar e modelar os ambientes de DC, (WIBRON, 2015) descreve que a modelagem provê informações detalhadas sobre temperatura e fluxo de ar no ambiente. Por fim, os trabalhos relacionados utilizam CRAC, mas não discutem os locais que precisam um maior fluxo de ar frio devido a uma temperatura maior e variável.

3.2 DINÂMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAIS

Os trabalhos relacionados ao estudo de correntes térmicas em ambientes de *Data Center* (DC), apresentados na seção anterior, estão focados em ambientes com correntes de ar direcionadas e controladas (*Computer Room Air Conditioner* (CRAC)). No entanto, segundo (SCHNEIDER, 2014) a porção de ambientes de DC de pequeno e médio porte que utilizam CRAC no Brasil gira em torno de 8%. O foco de atuação deste trabalho são ambientes de DC com sistemas de refrigeração *não-CRAC*.

Ambientes com refrigeração *não-CRAC* possuem corredores deficitários de correntes quentes e frias, quando os têm. Efetuar monitoração fina (e.g., a cada metro²) em ambientes sem direcionamento e controle de ar é impraticável. Uma solução possível é a modelagem do ambiente de DC em software de simulação numérica de fluidos. A *Computational Fluid Dynamics* (CFD) é uma simulação numérica do fluxo dos fluidos. Pode ser utilizada para prever velocidades dos fluidos, temperaturas, e outras variáveis de interesse para diversas áreas de aplicação.

Ao longo dos anos, ela tem sido utilizada para simular o fluxo de ar da asa de aviões, comportamento da água no casco de um navio, analisar *design* de veículos automotivos, prever o tempo necessário para misturar dois ou mais líquidos e para testes

de estratégias que buscam reduzir emissões de poluentes na atmosfera (MARSHALL; BEMIS, 2011).

As equações da mecânica de fluidos são derivadas das leis de conservação para massa, impulso e energia. Essas equações podem ser declaradas de forma diferencial ou integral, aplicando as leis de conservação a um ponto ou a uma região extensa do fluido, respectivamente (WIBRON, 2015). Entretanto, as equações de conservação e dinâmica de fluidos não serão abordadas neste trabalho devido a utilização de simuladores. Alguns softwares simuladores CFD utilizados no mercado são: *ANSYS* (ANSYS, 2018), *AutoDesk CFD Motion* (AUTODESK, 2018), *Flow-3D* (FLOW3D, 2018), *COMSOL Multiphysics simulation platform* (COMSOL, 2018), *sim-Flow CFD Software* (SIMFLOW, 2018).

Com o auxílio de simuladores CFD é possível modelar ambientes de DC *não-CRAC*. Mobiliário, servidores, monitores, evaporadores, UPS, *switches* e qualquer outro componente do ambiente real do DC são representados no modelo virtual. Alguns dos componentes influenciam no direcionamento das correntes de ar, tais como mesas ou pilares, mas não alteram (ou tem pouca influência) a temperatura ou umidade da corrente de ar. Outros, como ventiladores das fontes de servidores ou evaporadores, afetam diretamente na intensidade e na própria temperatura da corrente de ar. Modelar o ambiente virtual é trabalhoso, mas permite que se conheça o comportamento das correntes de ar do ambiente de DC mesmo que ele ainda esteja em fase de projeto.

Entretanto, os modelos virtuais de ambientes de DCs simulados por softwares CFDs são estáticos. O usuário insere, manualmente, todas as características que representam o comportamento dos componentes do DC. O software, por sua vez, responsabiliza-se por representar a integração das correntes no ambiente. Portanto, para que a simulação seja fiel ao comportamento do ambiente de DC real, o usuário tem que inserir os dados oriundos da combinação de todas as variáveis possíveis de todos os componentes do DC, algo inviável.

3.3 INTERNET DAS COISAS

Internet of Things (IoT) está presente na área de eletrônica e automação industrial a mais de 20 anos. Porém, popularizou-se, mais recentemente, englobando o conceito de rede de objetos com capacidade de se conectar, coletar e transmitir dados via rede. Associada a área de sistemas embarcados, possuem a atribuição de capacidade de processamento de informações, através de software processado internamente em um hardware dedicado (MADAKAM; RAMASWAMY; TRIPATHI, 2015).

Hardwares IoT são desenvolvidos por fabricantes distintos, têm arquiteturas

específicas e são suportados por diversos sistemas operacionais. Portanto, o número de combinação de plataformas possíveis com IoT é alto (LEE; LEE, 2015). No caso de soluções com microprocessadores, a plataforma conta com sistemas operacionais embarcados, baseados em *GNU/Linux* customizados. Na maioria dos casos, a customização do *GNU/Linux* embarcado restringe-se a alteração do *kernel* com o intuito de otimizar, principalmente, os *drivers* (RICHARDSON; WALLACE, 2013).

Por outro lado, dispositivos com microcontrolador carregam o código desenvolvido através de um *bootloader*. Assim, *firmware* é o termo que se refere a qualquer código carregado em memória *flash* de um microcontrolador (HUGHES, 2016). Comparando as duas soluções, no que se refere a capacidade de memória e de processamento, os microcontroladores têm fortes limitações, enquanto os microprocessadores possuem maiores capacidades, em compensação, os microcontroladores destacam-se com tempos de resposta inferiores aos dos microprocessadores.

Independente da solução e das características dos dispositivos IoT, os microprocessadores ou microcontroladores são unidades centrais para sensores e atuadores IoT. Sensores são periféricos pequenos e baratos que podem ser utilizados, em grande quantidade, para captar informações em um ambiente real. Em um ambiente de DC, eles podem ser úteis para captar temperatura, umidade do ar, pressão atmosférica, corrente, tensão, velocidade do ar, qualidade do ar, entre outros. O modelo arquitetural de comunicação entre a unidade central e os periféricos (sensores e atuadores) é o cliente/servidor. No entanto, a comunicação entre duas ou mais unidades centrais ou entre uma unidade central e computadores permite a exploração de outros modelos arquiteturais de comunicação existentes na literatura (e.g., *peer-to-peer*).

Assim como as plataformas, a quantidade de protocolos de comunicação em ambiente IoT também chama a atenção. Atualmente no mercado, pode-se adquirir dispositivos IoT com suporte a *Zigbee* (ZIGBEE, 2018), *Z-Wave* (Z-WAVE, 2018), *Thread* (THREAD, 2018), *RFID* (RFID, 2018), *NFC* (NFC, 2018), *LoRaWAN* (LORAWAN, 2018), *SigFox* (SIGFOX, 2018), *Wifi* (WI-FI, 2018), *Bluetooth* (BLUETOOTH, 2018), entre outras. As principais métricas de escolhas são: alcance, requisitos de dados, segurança e consumo de bateria (OLIVEIRA, 2017).

A Tabela 4 fornece uma breve comparação entre os protocolos existentes e as métricas mais comuns. Para exemplificar, dentre os protocolos de curtas distâncias, destacam-se *Wifi* e *Bluetooth*, principalmente, pela popularidade e número de dispositivos compatíveis com estas tecnologias. Dentre os protocolos de comunicação de longa distância, foram elencados os protocolos *LoRaWAN* e *SigFox*, que destacam-se por possuírem longo alcance, baixo consumo de energia, porém pecam com baixa taxa de transmissão (LORAWAN, 2018; SIGFOX, 2018).

Tabela 4 – Protocolos de Comunicação em Dispositivos IoT

Tecnologia	Alcance	Padrão	Segurança	Consumo de energia
Bluetooth LE	10m	IEEE 802.15.1	AES	Baixo (~12.5 mA)
LoRaWAN	>10km	IEEE 802.15.4	AES/E2E	Médio (~25-35 mA)
RFID/NFC	0.05-5m	ISO 13157	Não/AES	Médio (~50 mA)
SigFox	>10km	IEEE 802.15.4	E2E	Médio (~30-40 mA)
Thread	30m	IEEE 802.15.4	AES/Rede	Baixo (~20 mA)
Wi-Fi	100m	IEEE 802.11	WPA2	Alto (~116 mA)
Zigbee	100m	IEEE 802.15.4	AES BC	Médio (~40 mA)
Z-Wave	30m	ISM	AES	Baixo (~2.5 mA)

Fonte: O autor

A aplicação de IoT na monitoração de ambientes de DC, sob a ótica de protocolos de comunicação entre os dispositivos IoT, deve garantir baixo consumo e cobertura interna do DC. Ambientes de DC são considerados críticos e, como descrito na Seção 2.1.1, classificados pelo grau de disponibilidade de seus serviços. Portanto, utilizar-se de protocolos alternativos de comunicação sem fio, independentes de infraestruturas centralizadas é essencial neste ambiente. Tecnologias sem fio, com longo alcance, baixo consumo e independentes de infraestruturas locais, tais como *LoRaWAN* e *SigFox* são interessantes para módulos de alertas em soluções de monitoramento em ambientes de DC.

A aplicação de dispositivos IoT em ambientes de DC tem sido prática comum. Dentre os trabalhos estudados nesta área específica destacam-se: (FAHRIANTO et al., 2017) desenvolveu um sistema inteligente de monitoração de DC baseado em IoT, (LIU et al., 2016) um controle inteligente de auxílio do sistema de refrigeração com IoT e (LEVY; HALLSTROM, 2017a) um sistema de monitoramento e gerenciamento de DC confiável e com método não intrusivo.

Portanto, IoT se mostra uma tecnologia barata e adequada a ambientes de DC, sobretudo, de pequeno e médio porte, onde o projeto de implantação, normalmente, não conta com estruturas sofisticadas de direcionamento de correntes de ar. O uso de IoT possibilita a monitoração do ambiente real, porém não permite a cobertura fina do ambiente (e.g., a cada metro²), por exemplo. Considere uma sala de DC com largura, comprimento e altura, respectivamente, com 5x5x3 metros, totalizando 75 sensores. Mesmo que seja possível a integração destes sensores em um conjunto de unidades centrais, a distribuição destes sensores na sala impossibilitaria o trânsito de pessoas no ambiente, necessários, por exemplo, para manutenção dos equipamentos.

3.4 CONSIDERAÇÕES PARCIAIS

O monitoramento térmico em ambientes de DC é uma realidade e essencial, independente da norma utilizada, da classificação almejada ou do porte do DC. Ambientes de DC de grande porte, providos de maiores recursos financeiros, estão instalados em infraestruturas sofisticadas (e.g., piso elevado, *racks* selados e sistemas de refrigeração CRAC). Soluções comerciais completas de gerenciamento focam nestes ambientes, fornecendo também monitoramento térmico.

Ambientes mais modestos, DC de pequeno e médio porte, não acompanham esta realidade. Em sua esmagadora maioria, possuem sistemas de refrigeração *não-CRAC*, dificultando o monitoramento térmico do ambiente. Uma alternativa para compreender as correntes de ar nestes ambientes é a simulação CFD. Softwares de simulação CFD são usados em projetos de ambientes de DC, fornecendo flexibilidade de movimentação dos componentes do DC e observação rápida e ágil dos resultados. Eles também fornecem ambientes gráficos com visualização 3D que facilitam o deslocamento do ponto de observação e, consequentemente, a identificação de problemas.

Todavia, eles não possuem vínculo com o ambiente real, no caso, o ambiente de DC. A cada alteração de comportamento, por exemplo, um servidor foi desligado, o usuário é obrigado a alterar os parâmetros no simulador e refazer a simulação. Inserir todos os dados oriundos da combinação de todas as variáveis possíveis de todos os componentes do DC é algo inviável.

Por outro lado, soluções de monitoração utilizam-se de tecnologias IoT com sensores e atuadores implantados diretamente no ambiente de DC. Pequenos e baratos, vários sensores e captores são distribuídos pelo ambiente, possibilitando a coleta e atuação em diversos componentes. No entanto, a cobertura fina do ambiente é impraticável com o uso de tecnologias IoT.

4 SOLUÇÃO IOT MONTERDC

O monitoramento térmico em ambientes de *Data Center* (DC) de pequeno e médio porte, com sistemas de refrigeração *não-CRAC*, é uma necessidade. No Capítulo 3, duas soluções para este problema foram apresentadas: softwares de simulação e sensoriamento *Internet of Things* (IoT). No entanto, nenhuma cobre o problema em sua totalidade. Neste Capítulo, são apresentados os aspectos que compõem a Solução Monitoramento Término de Data Centers (MonTerDC), que atua exatamente nesta lacuna da literatura.

4.1 DEFINIÇÃO DO PROBLEMA

A concentração de equipamentos de TI em ambientes de DC de pequenos e médios portes é uma realidade na área de processamento em larga escala. Estes ambientes de DC são heterogêneos, desde hardware quanto de software. Com o surgimento e expansão do uso de nuvens computacionais, baseadas em DC e preocupadas com custos, a monitoração passou a ter um papel essencial para a gerência de DCs. Normas, classificações, leis de sustentabilidade, TI Verde e eficiência do uso dos recursos reforçam a necessidade de controle destes recursos, por parte do administrador. Portanto, em ambientes de DC, para administrar, é necessário monitorar.

Pode-se ainda afirmar que a monitoração de recursos não é algo novo. Porém, no contexto atual do problema de monitoração de ambientes de DC *não-CRAC*, a monitoração clássica de taxa de consumo do processador ou quantidade de memória ocupada não é mais suficiente. As métricas (e.g., temperaturas, umidade, pressão) elencadas nas normas dos equipamentos, para se ter direito a garantia, ou regras de TI Verde (e.g., *Power Usage Effectiveness* (PUE), *Water Usage Effectiveness* (WUE), *Data Center Infrastructure Efficiency* (DCiE), *Carbon Usage Effectiveness* (CUE), *Green Energy Coefficient* (GEC)) exigem a monitoração do ambiente de DC como um todo, vinculando métricas e seus impactos.

Neste novo cenário imposto, a simplificação do problema com software de simulação *Computational Fluid Dynamics* (CFD) ou a monitoração de grão grosso, possíveis através sensoriamento IoT não atendem os requisitos de ambientes de DC atuais. A proposta da Arquitetura MonTerDC atua com monitoração de grão fino, integrando softwares simuladores de CFD a tecnologias de sensoriamento IoT. Fornece uma ferramenta visual 3D com monitoração *online* do mapeamento térmico por zonas, respeitando a exigência regionalizada do DC. A arquitetura MonTerDC permite ao administrador associar consumo energético do DC a formação de zonas resultan-

tes de má distribuição de carga ou posicionamento incorreto de evaporadores e/ou equipamentos de TI.

4.2 PROJETO DE IMPLANTAÇÃO DOS SENSORES

Com a popularização de dispositivos para IoT, a possibilidade de implementar sistemas com centenas ou milhares de sensores se tornou uma realidade. Em ambiente de DC, o custo de um sensor é pequeno, quando comparado aos custo dos demais equipamentos de TI. No entanto, utilizar-se de centenas ou milhares de sensores, muitos cabeados, para cobrir totalmente a área do ambiente de DC é inviável e desnecessário. Assim, a análise desta seção foca-se na concepção de um projeto de implantação de sensores, cujo o objetivo é minimizar o número de sensores necessários ao sistema MonTerDC em um ambiente de DC.

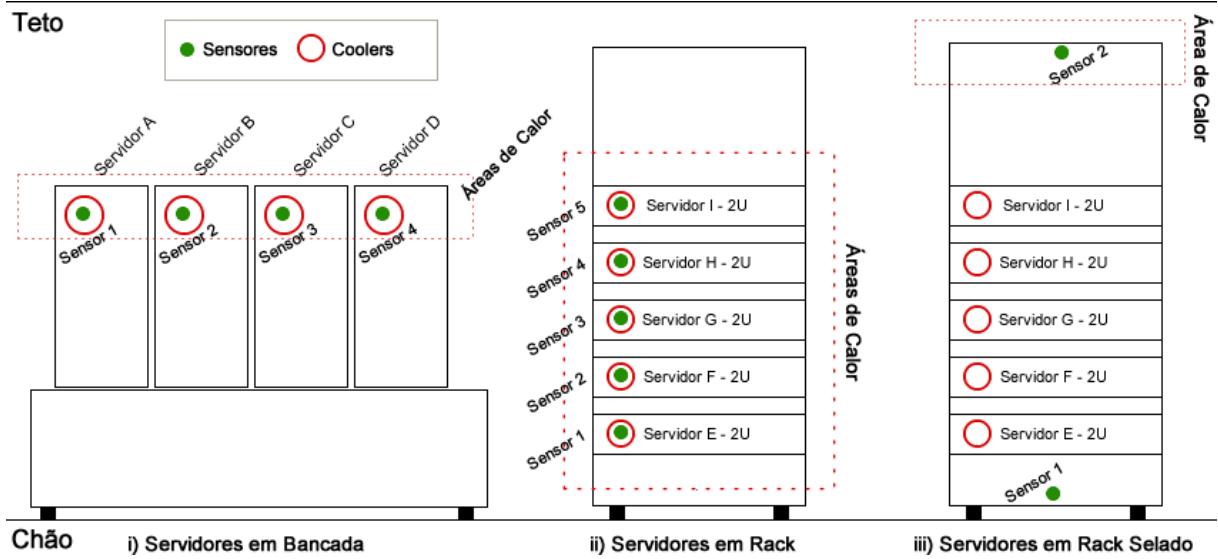
O projeto de implantação de sensores é específico a cada ambiente e dependente: (i) da planta física do ambiente de DC; e (ii) das fontes geradoras de ar, tanto frio quanto quente (WOUWER et al., 2000). Com a planta física do DC em mãos, o administrador deve modelar o ambiente físico, nomeado de Modelagem 3D, no padrão e no software de simulação CFD associado ao módulo Núcleo MonTerDC (seção 4.4.2), informando posições e dimensões de todos os móveis, pilares, *racks*, servidores, etc. Em seguida, deve-se definir as posições e descrever as características das fontes geradoras de ar (fria ou quente, intensidade). Nesta etapa, a preocupação é a precisão das medidas, pois um dos elementos de sucesso da identificação das zonas é o posicionamento correto dos obstáculos e escala.

Após finalização da modelagem do ambiente, o administrador passa a ter a visão completa do ambiente, mas ainda não possui as correntes de ar nem as zonas térmicas. Com o ambiente físico do DC modelado, o método de definição do número de sensores passa por uma etapa de pré-posicionamento. O objetivo desta etapa é identificar o número mínimo de sensores físicos, para este ambiente específico, de acordo com as correntes de ar descritas pelas equações CFD. No pré-posicionamento, implanta-se um sensor por gerador de ar quente, sejam eles servidores, *switches* ou outro componente gerador de calor.

Em seguida, mesclam-se as informações geradas pelo simulador CFD com aquelas obtidas no ambiente real pelos sensores, obtendo-se, desta forma, o primeiro mapeamento térmico do DC monitorado. A abordagem de definição mínima de sensores utilizada é a intuitiva, um sensor por gerador de ar, pois estes geradores de ar são os principais influenciadores na formação das zonas térmicas (WOUWER et al., 2000). Na Figura 2, tem-se as formas mais usuais de disposição de servidores em um DC: (i) servidores abertos em torre; (ii) servidores de *rack*; e (iii) servidores de

rack selados. Servidores tipo torre em bancadas (Figura 2 (i)) não têm sua saída de

Figura 2 – Projeto de Mapeamento de Sensores



Fonte: O autor

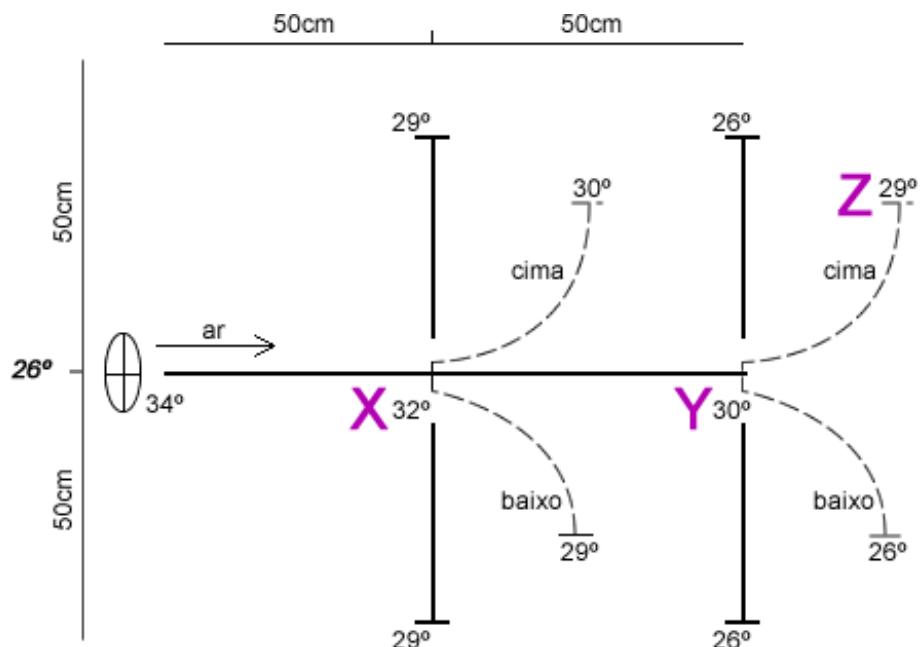
calor direcionada. Como, neste caso, a corrente de ar não tem direcionamento, faz-se necessário a implantação de um sensor por servidor (Neste exemplo, de *A* ao *D*) próxima a cada fonte geradora de calor (*cooler*). A segunda disposição estudada foi a de servidores em *rack* (Figura 2 (ii)). Um *rack* de servidores tem protetores laterais com furos para ventilação, porta frontal e abertura na parte traseira. Os geradores de ar (*coolers*), entre 1 e 2 por servidor, estão dispostos na parte traseira e, assim como os servidores tipo torre, não tem os seus fluxos de ar direcionados. Portanto, embora estes geradores de ar estejam em um *rack*, o número mínimo de sensores é de um por fonte de calor (*cooler*). O último caso estudado (Figura 2 (iii)) é o do comportamento de servidores em *rack* selado. Neste caso, o fluxo de ar está concentrado em dois pontos, um na parte superior e outro na parte inferior do *rack*, possibilitando que o número mínimo de sensores seja reduzido a 2.

Um sensor é capaz de medir com precisão a temperatura no local exato que foi posicionado. No entanto, a fonte geradora de ar quente (Servidores) formam correntes de ar que, por sua vez, deslocam-se distanciando do sensor. A arquitetura MonTerDC necessita do comportamento das temperaturas ao longo da corrente. Para se obter monitoração de grão fino com sensoriamento de grão grosso, apoiou-se na simulação de dinâmica de fluidos computacionais. Para comprovar a acurácia dos simuladores de CFD neste contexto, e garantir a viabilidade de implantação de um sensor por fonte geradora de calor, foi realizado o experimento através do protótipo físico elaborado de acordo com o esquema descrito na Figura 3. O protótipo reproduz um módulo de um

ambiente real monitorado com tecnologia IoT em grão fino, permitindo que os resultados obtidos com o experimentos sejam confrontados com o resultados simulados.

No experimento, instalou-se uma fonte de calor a uma altura de 1m do chão e temperatura constante de 34°C . Em um ambiente de 4m^2 , sem obstáculos laterais ou frontais, posicionou-se 7 sensores distribuídos em 3 linhas. A linha central de sensores foi posicionada a 1m do chão, portanto, na mesma altura da fonte de calor. O primeiro sensor da linha foi posicionado junto a fonte de calor, seguido por dois outros, um (representado pelo X) a 50cm da fonte e outro (representado pelo Y) a 100cm da fonte. A linha superior foi posicionada 50cm acima da linha central e constituída por dois sensores, um acima do X e outro acima do Y . A mesma lógica foi seguida para a linha inferior, ela também foi composta por dois sensores posicionados 50cm abaixo da linha central.

Figura 3 – Monitoração de grão fino com sensoriamente IoT



Fonte: O autor

Nos resultados, a temperatura mais alta medida foi junto a fonte de calor. A medida que a corrente de ar quente se afastava da fonte, a temperatura reduzia, no ponto X atingiu 32°C e no ponto Y 30°C . O experimento também demonstrou que o ar quente sobe, pois as temperaturas observadas na linha superior são maiores do que as da linha inferior.

Após os testes físicos, o mesmo experimento foi realizado em um software simulador de dinâmica de fluídos (CFD). As correntes de ar foram simuladas no software *Ansys Fluids* com os dados coletados pelo sensor real, posicionado na saída

de ar quente (Fonte geradora de calor). Na simulação, pode-se observar o mesmo comportamento do protótipo físico com 7 sensores. Portanto, em ambientes abertos, o posicionamento de um único sensor junto a fonte de calor é suficiente para que o software simulador consiga fazer a projeção dos dados e consequentemente a simulação 3D do ambiente.

Após a finalização da fase de pré-posicionamento, inicia-se a fase de calibração, a qual caracteriza-se pela análise cíclica do mapeamento de zona térmicas. Esta fase é dependente do administrador do DC, que tem a responsabilidade de incluir ao modelo as peculiaridades do ambiente físico. O administrador deve analisar os pontos cegos, locais onde o pré-posicionamento não foi capaz de definir a zona térmica, e incluir novos sensores, se necessário. Embora o padrão seja um sensor por fonte geradora de ar quente ou frio, este número varia de acordo com o ambiente e a interação com o administrador é essencial para o sucesso desta calibragem. Finalmente, a última etapa é Configuração do Software, que é responsável por guardar e manter as configurações definidas na fase de calibração. O ciclo se encerra quando o administrador obtiver o mapeamento total do ambiente de DC.

4.3 ESPECIFICAÇÃO DE REQUISITOS

A concepção de uma ferramenta de monitoração exige a especificação de requisitos e a definição de área de atuação. A análise e desenvolvimento da arquitetura MonTerDC não é diferente e segue os requisitos funcionais e não-funcionais descritos nas Tabelas 5 e 6.

Tabela 5 – Requisitos Funcionais e de Negócio

Requisitos Funcionais	
RF1	Integrar os módulos através de protocolos de comunicação nativos
RF2	Armazenar e Processar dados coletados pelos módulos de sensores
RF3	Receber Requisições em JSON através de uma <i>Application Programming Interface (API)</i>
RF4	Exportar os dados coletados em JSON para uso em Simulador CFD
RF5	Utilizar um simulador CFD para modelagem e simulação 3D

Fonte: O autor

Os requisitos funcionais, referentes as necessidades técnicas, são apresentados na Tabela 5. MonTerDC foi concebido em estrutura modular, o que torna os componentes (módulos) independentes de funções e de tecnologias. RF1 deve garantir que tecnologias específicas, com requisitos específicos, sejam integrados. Atingir este requisito depende de protocolos de comunicação para integração e troca de dados e operações entre eles.

O componente centralizador dos dados da solução é um banco de dados. Este banco de dados é visível a todos os componentes e fornece um modelo de autenticação e permissões sobre os dados, individuais e especialistas, para cada componente. Desta forma, MonTerDC pode controlar concorrência de escrita em tabelas, por exemplo, fornecendo direito de escrita somente a um módulo e de leitura a vários outros. O atendimento ao RF2 exige que sensores ou módulos de pré-processamento filtrem e processem dados antes do armazenamento. A especificação deste requisito advém do contexto de monitoração deste trabalho, onde sensores IoT geram volume de dados de grande escala.

O formato de mensagem entre módulos (entrada e saída) definido foi o JSON, respondendo aos requisitos funcionais RF3 e RF4. A escolha se deu pela facilidade de entendimento humano e, sobretudo, pela compatibilidade com módulos de gerenciadores de nuvens computacionais (e.g., OpenStack) e simuladores CFDs. O principal uso do JSON está na interação com a API do MonTerDC, módulo que permite a integração com gerenciadores de nuvem.

Finalmente, o requisito RF5, exige que o simulador CFD integrado ao MonTerDC tenha a capacidade de automatização da simulação através de entradas no formato JSON.

Tabela 6 – Requisitos Não Funcionais

Requisitos Não Funcionais	
RNF1	Arquitetura Modular e Expansível
RNF2	Integração com Sistemas Gerenciadores de Nuvem
RNF3	Interface Web de gerenciamento
RNF4	Interface Web para Visualização 3D
RNF5	Componentes de hardware livre
RNF6	Arquitetura e Código <i>Open Source</i>
RNF7	Replicabilidade em Ambientes Heterogêneos

Fonte: O autor

Os requisitos não funcionais são apresentados na Tabela 6. O requisito RNF1 define que a arquitetura MonTerDC deve ser modular e expansível. O objetivo deste requisito é tornar a ferramenta customizável, uma necessidade eminente em ambiente de DC *não-CRAC*. A integração com sistemas de gerenciadores de nuvem computacional, requisito RNF2, busca possibilitar a associação de elementos de monitoração fornecidos pela ferramenta em um ambiente já conhecido pelo administrador de nuvem.

Os requisitos RNF3 e RNF4 tratam da acessibilidade, flexibilidade e facilidade

de interação com a ferramenta, através de uma interface Web. Finalmente, os requisitos RNF5, RNF6 e RNF7, especificam aspectos para a escolha dos componentes que garantam a cobertura de dois dos principais desafios de sistemas distribuídos, sistemas abertos (tanto em hardware quanto em softwares) e heterogeneidade de plataforma. Os requisitos funcionais e não-funcionais impactaram nas escolhas e definições da arquitetura e do protótipo MonTerDC.

4.4 ARQUITETURA MONTERDC

A arquitetura MonTerDC auxilia o administrador de DC de pequeno e de médio porte na tomada de decisão e possibilita a concepção de sistemas integrados a gerenciadores de nuvem que otimizem seus recursos de acordo com a formação de zonas térmicas. O conjunto de módulos da Arquitetura MonTerDC ainda possibilita a visualização *online* de correntes de ar e o mapeamento de zonas térmicas em ambiente de DC.

A concentração de processamento em DCs é uma realidade. A monitoração destes ambientes é essencial tanto para administradores quanto para usuários que buscam eficiência no uso dos recursos em prol de suas aplicações ou, simplesmente, otimização de custos. A proposta de arquitetura do MonTerDC, ambiente de Monitoramento Térmico de DC, tem por objetivo fornecer um mapa térmico dinâmico *online* de DCs *não-CRAC*. Este ambiente consiste da definição de módulos de hardwares e de softwares que, integrados, permitem a identificação e mapeamento de zonas térmicas.

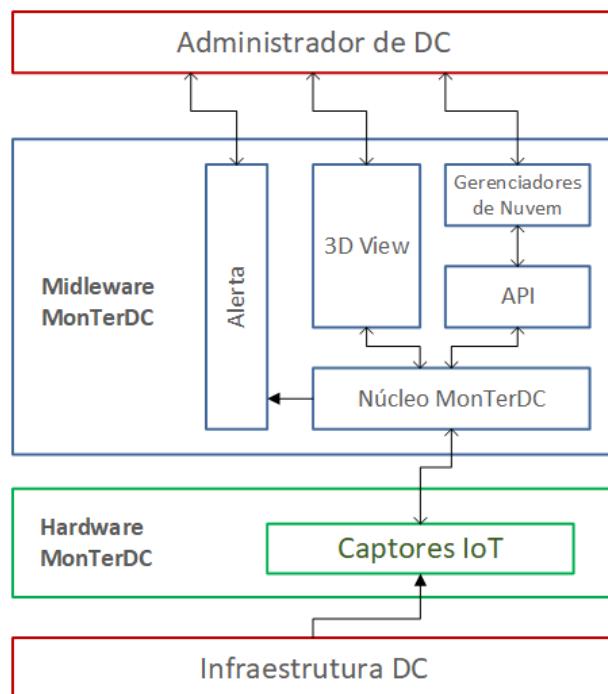
Em ambientes de DCs com sistemas de refrigeração *não-CRAC*, as correntes de ar frio e quente não são guiadas por projetos de canaletas, tubos, pisos elevados ou injeção de ar. Como a arquitetura proposta não tem como objetivo identificar os modelos e simplificações de geração de áreas termais (DOBS; HENCEY, 2012), define-se como zonas térmicas espaços com características de aquecimento e refrigeração similares e suas adjacências (BROWN, 2012). A formação de zonas indesejáveis, que excedam as temperaturas máximas especificadas nas normas, são afetadas pela intensidade do gerador de calor ou pelo número de geradores concentrados, pela pressão da injeção de ar e pela umidade. Nestes ambientes, onde o controle dos fatores que influenciam na formação de zonas indesejáveis não são controlados, a identificação de zonas térmicas indesejáveis torna-se mais complexa. A característica dinâmica dos fatores, o deslocamento das zonas e a interferência entre elas dificultam ainda mais a identificação.

Esta realidade é específica de DCs com sistemas de refrigeração *não-CRAC*, pois as zonas térmicas em DCs *Computer Room Air Conditioner* (CRAC) são bem definidas e controladas, com temperaturas baixas na parte inferior e quentes superi-

ores, variando apenas os valores de acordo com a carga de trabalho dos servidores ativos (ATHAVALE et al., 2016). O mapeamento do comportamento térmico em um DC depende da identificação das correntes de ar no ambiente (SASAKURA; AOKI; WATANABE, 2017; CAMILLO et al., 2017). A análise de consumo energético em função da movimentação térmica exige monitoração tanto do consumo energético quanto das zonas térmicas (VODEL; RITTER, 2017). A caracterização de correntes de ar em um DC passa pelo sensoriamento das fontes geradoras de ar, tanto frio quanto quente.

A arquitetura MonTerDC (Monitoramento Térmico de Data Center) é um ambiente de monitoramento térmico de *Data Center*, cujo objetivo é fornecer um mapa térmico dinâmico *online* de DCs *não-CRAC*. A estrutura física e lógica do MonTerDC tem arquitetura modular e foco de atuação no monitoramento de DCs de pequeno e médio porte, baseado em sensores IoT. A estrutura da arquitetura está constituída em três camadas (Figura 4): (i) Hardware MonTerDC; (ii) Middleware MonTerDC; e (iii) Administração.

Figura 4 – Estrutura de Camadas MonTerDC



Fonte: O autor

4.4.1 Hardware MonTerDC

A primeira camada, *Hardware MonTerDC*, está ligada diretamente a infraestrutura do DC, que representa os equipamentos físicos, como servidores, sistemas de climatização, componentes de rede, UPS, etc. Essa camada é responsável pela coleta de dados através dos Captores *IoT*, que podem ser constituídos de vários captores implantados de acordo com as definições descritas na seção 4.2. O módulo Captores *IoT* é constituído por um conjunto de sensores *IoT*, fisicamente distribuídos no ambiente de DC, e interconectados a uma central de processamento (microcontrolador). Ele é responsável por coletar os dados dos sensores que periodicamente efetuam a leitura de dados externos segundo sua especialidade (temperatura e umidade).

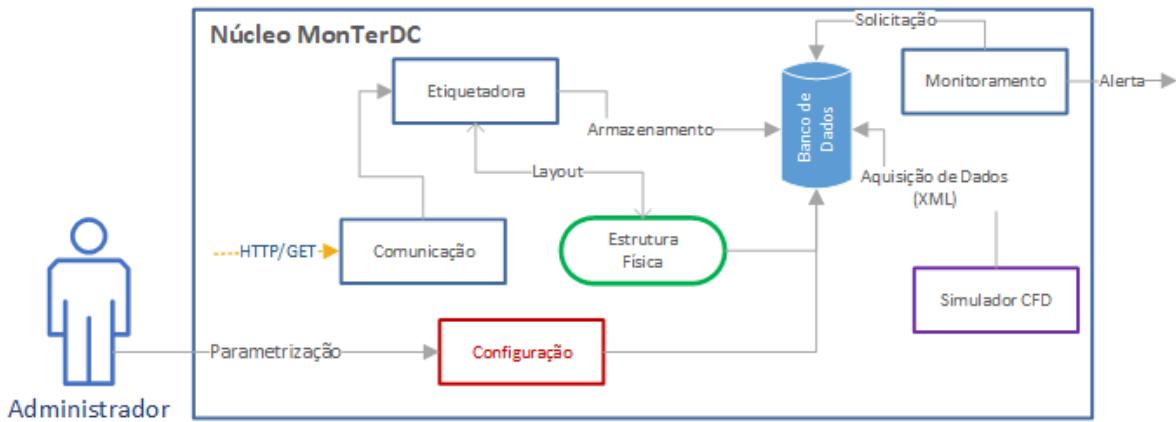
A coleta de dados pode ser adaptada as necessidades do administrador ou a características físicas do ambiente, podendo variar o tempo de captura, a quantidade de leituras e/ou o pré-processamento realizado. Com capacidades de armazenamento e processamento limitadas, a função dos Captores *IoT* restringe-se a aquisição das informações do ambiente de acordo com as especificações parametrizadas pelo administrador. O posicionamento físico dos sensores segue a descrição de uma planta baixa do ambiente de DC orientada pelos geradores de ar. A informação de cada sensor transcreve a situação individual de um determinado ponto do DC. No entanto, o processamento conjunto das informações dos sensores, vinculado ao posicionamento físico dos sensores, possibilita ao MonTerDC a identificação do comportamento do conjunto de sensores espalhados pelo ambiente.

4.4.2 Middleware MonTerDC

Na segunda camada, *Middleware MonTerDC*, o Núcleo MonTerDC é responsável pela centralização dos dados coletados, pelo processamento das informações e pela disponibilização dessas informações para os módulos API, 3D_View e Alerta. Devido a restrição de capacidade de armazenamento e processamento, já comentadas anteriormente, os Captores *IoT* transmitem seus dados periodicamente ao Núcleo MonTerDC. Estes dados são armazenados em um banco de dados que está associado e é controlado pelo próprio Núcleo MonTerDC.

Cada sensor permite a observação de um ponto específico do DC, caracterizando o comportamento térmico naquele ponto ao longo do tempo. Transformar o comportamento pontual destes sensores em zonas de mapeamento térmico no DC é responsabilidade do Núcleo MonTerDC (Figura 5). O Núcleo MonTerDC é capaz de controlar M Captores *IoT*, onde M é um número inteiro. O número máximo de Captores *IoT* depende da capacidade de processamento e de rede do dispositivo onde encontra-se o Núcleo MonTerDC.

Figura 5 – Detalhamento do Módulo Núcleo MonTerDC



Fonte: O autor

O componente que estabelece o par de comunicação com os Captores é nomeado de **Comunicação**. Ele recebe as solicitações dos Captores *IoT* e tem a responsabilidade de verificar a origem, o ID do captor, o tipo de sensor e os dados, contidos em cada mensagem. Em caso de necessidade de retorno do estado da solicitação ao Captor *IoT*, ele é o responsável pelo envio de retorno.

A **Etiquetadora**, outro componente do módulo Núcleo MonTerDC, faz o pré-processamento das mensagens recebidas pelo componente **Comunicação**. Ela associa os dados recebidos com a estrutura física do ambiente de DC, recuperada do componente **Estrutura Física**. O Algoritmo 1 apresenta o pseudo-código do processo de identificação e armazenamento dos dados, realizado pela **Etiquetadora**.

Algoritmo 1: ETIQUETADORA

Entrada: *idSensor, idTipo, valor*

Saída: *idLocalizacao*

```

1 início
2   se existeSensor() então
3     localizacao = buscaLocalizacaoFisica(idSensor);
4     status = armazenaLocalizacao(localizacao, idSensor, idTipo, valor);
5   fim
6 fim
7 retorna status
  
```

O componente centralizador das informações é o **Banco de Dados**, responsável por armazenar todas as informações processadas pelos componentes **Comu-**

nicação, Etiquetadora e Configuração. Estas informações podem ser lidas pelos módulos **Monitoramento** e **Simulador CFD**. O componente de **Banco de Dados** foi especificado como uma única base de dados constituído de sete tabelas. Os nomes e campos das tabelas são apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 – Tabelas e Campos do Banco de Dados

Tabela	Campos
captor	id (int), descricao (char 255)
tipoSensor	id (int), descricao (char 255)
captor_sensor	id (int), id_captor (int), id_sensor (int)
localizacao	id (int), id_captor_sensor (int), posX (int), posY (int), posZ (int)
dados	id (int), id_captor_sensor (int), valor (int)
configuracao	id (int), descricao (char 255)
configuracao_captor	id (int), id_captor (int), id_configuracao (int), valor (int)

Fonte: O autor

A tabela *captor* contém a identificação única (id) de cada Captor *IoT*. A tabela *tipoSensor* contém os tipos de sensores possíveis (e.g., pressão, umidade e/ou temperatura). A tabela *captor_sensor* associa os sensores aos Captores *IoT*. Na tabela *localização* são armazenadas as informações de localização física de cada sensor (X, Y e Z, em mm) e o id do Captor *IoT* associado. A tabela *dados* armazena as informações coletadas pelos Captores *IoT*, relacionando com os sensores e dados coletados. Finalmente, a tabela *configuracao* armazena o conjunto de parâmetros de configuração (classes) que são associados a tabela *configuracao_captor*.

Os dois últimos componentes do módulo Núcleo MonTerDC são: **Simulador CFD** e **Monitoramento**. O componente **Simulador CFD** é independente e específico. Ele é responsável pelos cálculos da simulação de dinâmica de fluidos computacionais (Simulação CFD). Tem como entradas o modelo virtual do ambiente de DC, estático, e as informações coletadas *online* pelos Captores *IoT*, dinâmicas. Ele processa os dados das entradas, renderiza o ambiente de DC com mapeamento térmico naquele instante, e exporta uma imagem 3D ou um arquivo JSON. Até este momento, o mapeamento térmico restringe-se a uma imagem 3D (estática) em escalas de cores associadas a faixas de temperaturas (em um determinado instante).

Finalmente, o componente **Monitoramento** acrescenta o aspecto dinâmico ao monitoramento térmico do ambiente DC, associando imagens 3D a temperaturas e grau de observação fino (Simulador CFD) a grosso (Captores *IoT*). Portanto, o Núcleo MonTerDC aplica, em um modelo simulado de CFD, os dados reais coletados individualmente associando-os a planta baixa do DC monitorado. O resultado deste pro-

cessamento é o mapa térmico atual do ambiente de DC, representando visualmente a relação entre as fontes geradoras de ar, as correntes de ar e as zonas térmicas.

O Administrador, por sua vez, tem três formas de acesso ao monitoramento do ambiente de DC via MonTerDC. São elas: API, 3D_View e Alerta (Figura 4). A API é o conjunto de interfaces para chamada de funções e procedimentos da biblioteca MonTerDC, permitindo a integração com gerenciadores de nuvem. A forma encontrada para possibilitar a interoperabilidade, entre a ferramenta MonTerDC e gerenciadores de nuvem heterogêneas (ver maiores detalhes na Seção 2.2.3), foi a utilização do formato de mensagem JSON.

Tabela 8 – Rotas da API

Rota	Parâmetro	Retorno (JSON)
status	idCaptor	{"id": "1", "status": "1"}
alarme	null	{"status": "1", "dataHora": "0000-00-00 00:00:00"}
temperatura	idCaptor	{"id": "1", {"sensor1": "valor1", "sensor2": "valor2", "...": "..."}}
umidade	idCaptor	{"id": "1", {"sensor1": "valor1", "sensor2": "valor2", "...": "..."}}
imagem	dataHora	{"url": "http://...."}

Fonte: O autor

A API do MonTerDC disponibiliza sete rotas de acesso aos dados, todas exigem autenticação. As rotas em uma API permitem que o cliente/solicitante informe os parâmetros de entrada e receba os dados na saída.

A autenticação é feita através de *Header Basic Authentication*, cujo usuários, pré-cadastrados pelo administrador, podem efetuar chamadas a API (Tabela 8). A rota **status** retorna a situação atual de um determinado Captor *IoT* (0 para *off-line* e 1 para *online*), através da passagem do parâmetro *idCaptor*. A rota **alarme** retorna a situação do sistema de Alarme, retornando 1 para ativado e 0, caso desativado, e a data/hora do evento. As rotas **temperatura** e **umidade** têm o mesmo parâmetro (*idCaptor*) e retornam um vetor de campos. O vetor é preenchido com os dados da última coleta disponível no banco de dados. A última rota da API é a **imagem**, que tem como parâmetro uma data/hora, e retorno, a *URL* da imagem 3D do mapeamento térmico do ambiente de DC, no instante solicitado e no ângulo pré-definido pelo administrador.

O segundo módulo que interage com o Núcleo MonTerDC é o 3D_View. Seu objetivo é viabilizar a visualização dinâmica e 3D do mapeamento térmico do ambiente de DC observado. Ele baseia-se em um servidor *Web* disponibilizando continuamente as imagens geradas pelo Núcleo MonTerDC. O usuário tem a escolha da visualização das correntes de ar, das zonas térmicas ou as duas juntas. As diferenças térmicas são indicadas de acordo com uma paleta de cores. Altas temperaturas são representadas

em tons de vermelho e baixas, em tons de verde. Valores intermediários variam entre o verde e o vermelho, apresentando regiões em azul, amarelo e laranja. A definição das faixas "altas" e "baixas" para atribuição das cores é parametrizada pelo administrador. O administrador deve definir as faixas de acordo com as normas e classificações (seção 2.1.1).

O módulo de Gerenciadores de Nuvem restringe-se, a uma camada de integração específica a cada sistema de gerenciamento de nuvem, localizado no próprio ambiente de gerenciamento de nuvem (e.g., OpenStack, CloudStack). Esta camada comunica-se com o a Solução IoT MonTerDC única e exclusivamente através da API MonTerDC.

O último módulo do *Hardware MonTerDC* é o Alerta. O módulo Alerta é aplicado a diferentes dispositivos (e.g., celulares, computadores pessoais) e protocolos (e.g., *Ethernet*, *Wifi*, *LoraWan*, *SigFox*, *EDGE*, 3G e 4G). Os alertas mais comuns são superaquecimento de equipamentos, incêndio, consumo de energia elevado, falhas de servidores ou de conexões. O módulo Alerta possui redundância de acesso à Internet, utilizando-se, *a priori*, da rede interna do DC e, em caso de falha, de rede alternativas de acesso a dispositivos IoT (ex: *SigFox*, *EDGE*, 3G e 4G). Dentre os módulos facultativos, o Alarme é totalmente independente. A ausência deste módulo deixa, simplesmente, a Solução IoT MonTerDC sem alerta e sem rede alternativa de alarmes, funções importantes para gerência de um ambiente com serviços críticos.

4.4.3 Administração

A última camada da arquitetura representa o usuário final do ambiente, Administrador de DC. A situação térmica e/ou energética do DC é disponibilizada ao administrador do DC através de três formas: (i) Gerente de recursos do Gerenciador de Nuvem selecionado, integrado ao mapa térmico MonTerDC; (ii) Aplicação 3D_View, também integrada ao mapa térmico MonTerDC, e disponibilizada pelo módulo 3D_View; e (iii) Dispositivos pessoais por meio do módulo Alerta, neste caso, somente texto.

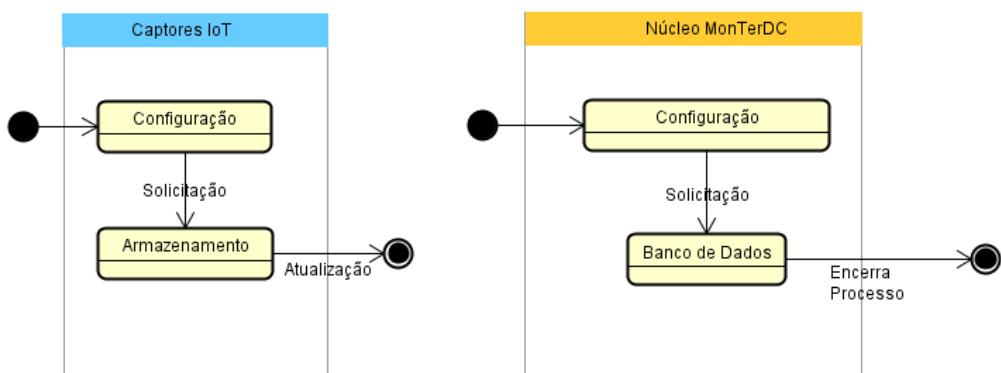
A camada administração envolve o controle da Solução IoT MonTerDC atuando, indiretamente, na parametrização, na coleta dos dados e na visualização dos cenários. Esta atuação no sistema percorrendo todas as demais camadas se faz através das operações MonTerDC. As operações MonTerDC são: Parametrização, Sensoriamento, Visualiza 3D, Gerenciamento e Alarme.

4.4.3.1 Operação Parametrização

A operação de parametrização sempre é iniciada pelo Administrador e pode ser aplicada a dois módulos do MonTerDC: (i) Captores *IoT*; e (ii) Núcleo MonTerDC.

O fluxo de execução da operação de parametrização dos Captores *IoT* é apresentado na Figura 6, a esquerda. O administrador, através da ferramenta de configuração *online*, seleciona os campos parametrizáveis e atribui os valores desejados. Em seguida, dispara a solicitação que será formatada no componente de **Armazenamento** e prossegue com a atualização. A operação pode ser individualizada, com parâmetros específicos para cada Captor *IoT*, ou em grupo, atualizando todos os Captores *IoT* ao mesmo tempo. Como pode ser observado, o fluxo é simples, os componentes **Configuração** e **Armazenamento** formatam e processam a solicitação, finalizando com a gravação em memória física interna do(s) Captor(es) *IoT* envolvido(s).

Figura 6 – Fluxograma Operação de Parametrização



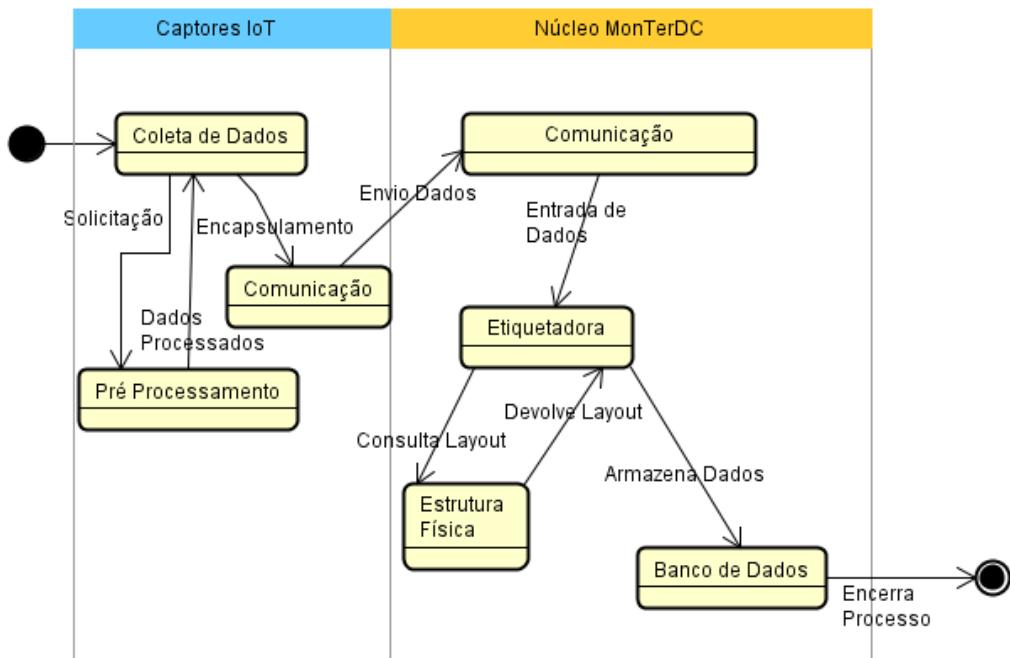
Fonte: O autor

O segundo fluxo da operação de parametrização, no Núcleo MonTerDC, também possui dois componentes: (i) **Configuração**, desenvolvido com a mesma tecnologia e interface do componente **Configuração** utilizado nos Captores *IoT*; e (ii) **Banco de Dados**, que atualiza os dados das tabelas correspondentes a configuração (ver Seção 4.4.2).

4.4.3.2 Operação Sensoriamento

A operação **Sensoriamento** é iniciada com o lançamento da Solução IoT MonTerDC e mantém-se ativa ao longo de toda a execução. Ela envolve os módulos Núcleo MonTerDC e Captores *IoT* (Figura 7). O intervalo entre as capturas, o método estatístico, o número de leituras e a ativação ou não do pré-processamento seguem o definido na operação parametrização (Seção 4.4.3.1). Portanto, a cada intervalo pré-configurado de captura, o módulo Captores *IoT* recupera os dados crus dos sensores, através do componente **Coleta de Dados**.

Figura 7 – Fluxograma da Operação Sensoriamento



Fonte: O autor

Caso o pré-processamento esteja desativado, os dados crus são repassados ao componente **Comunicação** do módulo Captores IoT, caso contrário, eles são encaminhados para o componente **pré-processamento**, deste mesmo módulo. O componente **pré-processamento** restringe-se a aplicação do método estatístico pré-configurado, definido na operação parametrização. Desta forma, dados crus de sensoriamento, com dezenas ou centenas de medidas (e.g., temperatura ou umidade), são resumidos a dois ou três valores processados (e.g., média, desvio padrão, mediana). O **pré-processamento** não faz a análise de qualidade dos dados, ou seja, ele aplica o método independente da variação dos dados coletados, podendo esconder comportamentos atípicos.

O fluxo da operação **Sensoriamento** segue no componente **Comunicação**. Este componente, localizado no módulo Captores IoT, constrói um pacote com os dados coletados, encapsulando e formatando estes dados. Na fase de encapsulamento, ele inclui o identificador único de cada sensor. Finaliza seu trabalho, enviando a mensagem para o componente **Comunicação** do módulo Núcleo MonTerDC.

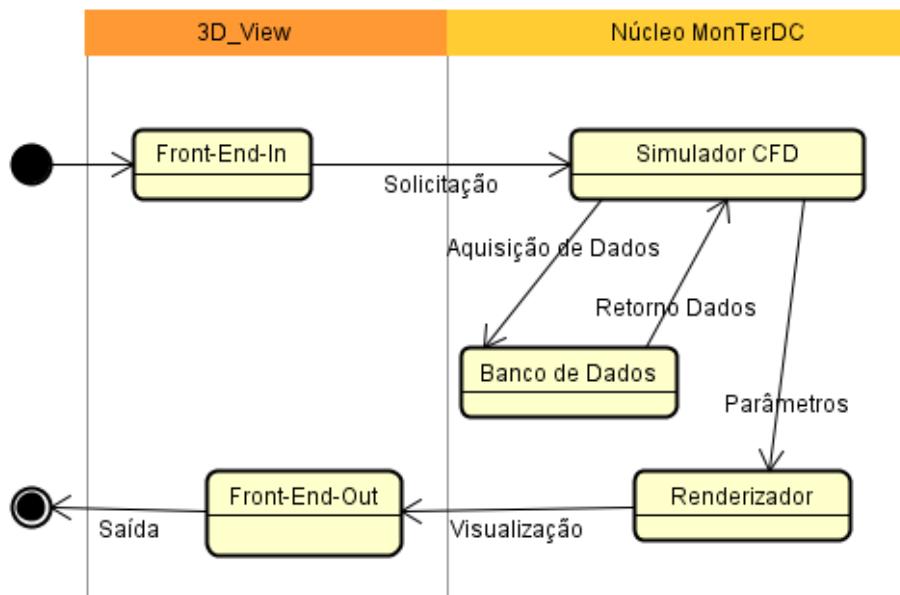
Dentro do módulo Núcleo MonTerDC, o componente **Comunicação** recebe os pacotes, desmonta o encapsulamento e repassa ao componente **Etiquetadora**.

Este componente, associa a informação recebida do componente **Comunicação**, com chave *id* do sensor, a localização física, recuperada do componente **Estrutura Física**. Finalmente, ele acrescenta a etiqueta e invoca o componente **Banco de Dados** que fará o armazenamento definitivo, encerrando a operação.

4.4.3.3 Operação Visualiza 3D

A operação **Visualiza 3D** é invocada sob demanda por um usuário cadastrado. Os módulos envolvidos nesta operação são 3D_View e Núcleo MonTerDC. Os componentes no módulo 3D_View restringem-se a um servidor *Web*, representados pelo *Front-End-In* e *Front-End-Out* (Figura 8). O usuário provoca uma solicitação ao *Front-End-In* que interpreta a solicitação e encaminha ao módulo Núcleo MonTerDC. O componente **Simulador CFD** recebe a solicitação, verifica se o solicitado está disponível no componente **Bando de Dados**. As informações recuperadas envolvem os dados dos sensores no momento solicitado (atual ou passado) e os parâmetros de visualização (e.g., ângulo de visualização, faixa de temperaturas, limiares).

Figura 8 – Fluxograma Operação Visualiza 3D



Fonte: O autor

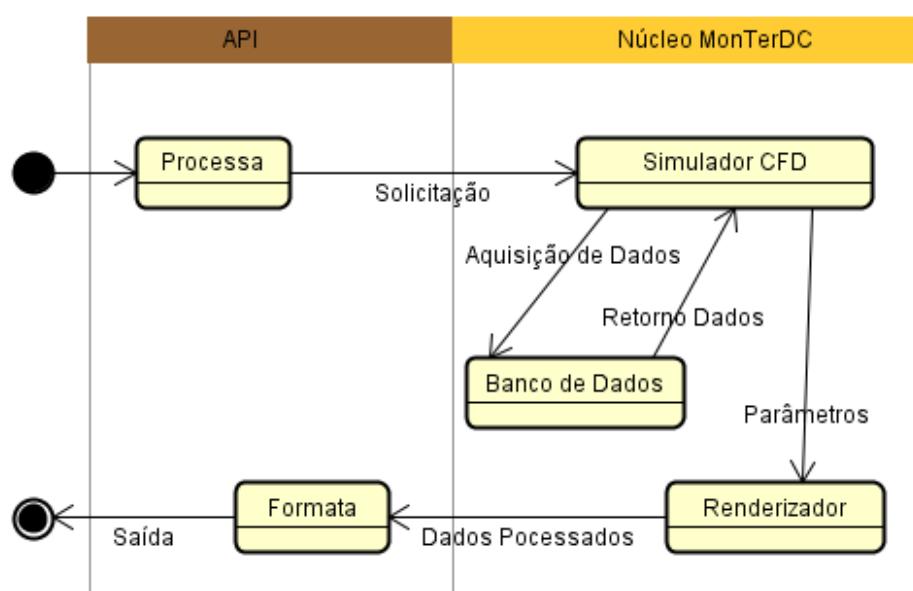
De posse destas informações, o componente **Simulador CFD** formata a entrada de dados para o simulador CFD associado e o executa. O simulador CFD, parte do componente **Renderizador**, gera a imagem correspondente ao cenário estático solicitado. Esta imagem é disponibilizada ao servidor *Web* e a mensagem visualização

é enviada ao *Front-End-Out*. Neste momento, o usuário está habilitado a visualizar o cenário solicitado via navegador e a operação encerra-se.

4.4.3.4 Operação Gerenciamento

A operação **Gerenciamento** envolve os módulos API e Núcleo MonTerDC (Figura 9). O principal objetivo da operação é permitir a visualização do monitoramento térmico de ambientes de DC integrado a soluções de gerenciadores de nuvem computacionais. No entanto, o uso de API com formato de comunicação JSON permite a integração a outras ferramentas, se necessário.

Figura 9 – Fluxograma Operação Gerenciamento



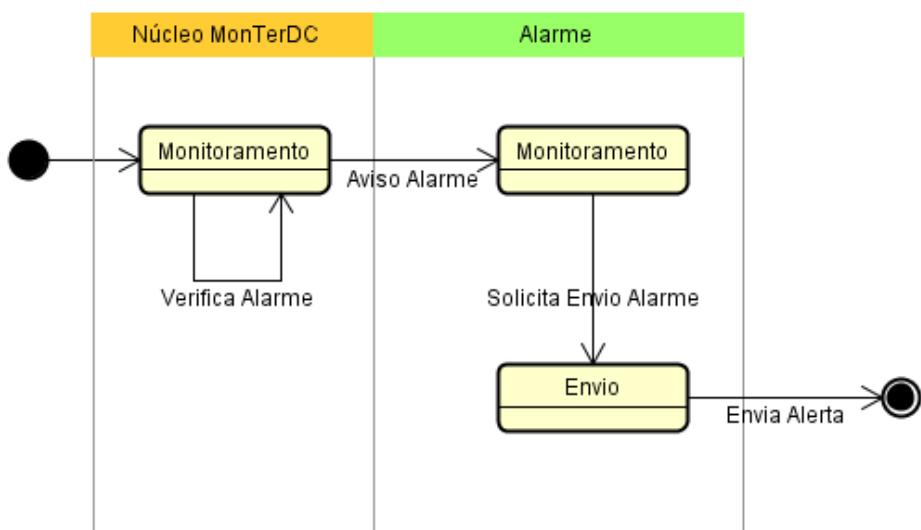
Fonte: O autor

A operação é iniciada pela ferramenta de origem, seja ela um gerenciador de nuvem ou qualquer outra específica. O componente *Processa* recebe uma chamada API de uma ferramenta externa ao sistema. Ele valida a chamada, verificando a consistência da interface do procedimento ou função solicitada. Caso esteja correta, ele formata a solicitação e envia ao componente **Simulador CFD** do módulo Núcleo MonTerDC. O componente **Simulador CFD** procede da mesma forma que na operação **Visualiza 3D**, retornando uma imagem estática do cenário solicitado pela ferramenta. Finalmente, o componente *Formata* adequa os dados no formato da resposta, retornado a mensagem a ferramenta de origem.

4.4.3.5 Operação Alarme

A exemplo da operação **Sensoriamento**, a operação **Alarme** é iniciada com o lançamento da Solução IoT MonTerDC. Este componente pode estar habilitado, desabilitado ou não existir no sistema, pois ele não é obrigatório. Caso esteja habilitado, ele é controlado pelo componente **Monitoramento**, localizado no módulo Núcleo MonTerDC, onde a operação Alarme é iniciada (Figura 10). Em um ciclo repetitivo, o componente **Monitoramento** analisa os dados coletados e compara com os limiares e as métricas determinadas pelo administrador. A este procedimento, deu-se o nome de *Verifica Alarme*. Havendo dados fora das faixas estipuladas, o componente **Monitoramento** envia a mensagem *Aviso Alarme* ao componente **Monitoramento** do módulo Alarme.

Figura 10 – Fluxograma da Operação Alarme



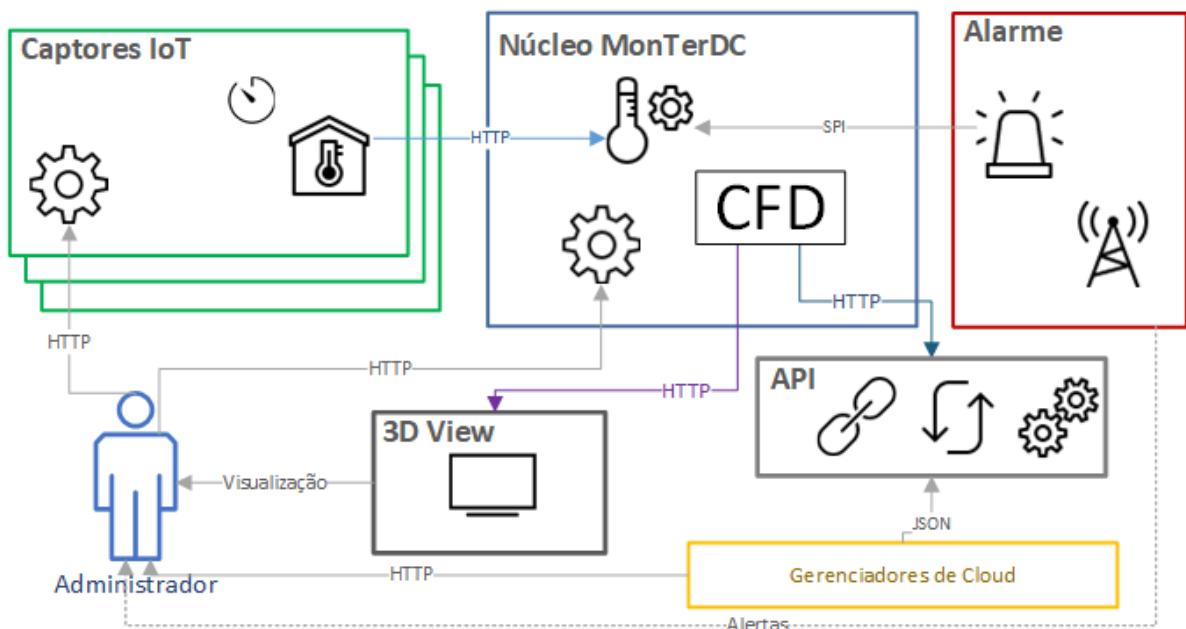
Fonte: O autor

O componente **Monitoramento** do módulo Alarme identifica as vias de comunicação (e.g., *Ethernet*, *SMS*, *SigFox*) e métodos de alarme ativos (e.g., mensagens via gerenciador de nuvem, sinal sonoro, luz de emergência). Uma vez de posse das vias de comunicação ativas e dos métodos de alarme disponíveis, ele solicita o envio do alarme ao componente **Envio**. O componente **Envio** é especializado podendo ser um simples processo no servidor, que envia o alerta via Internet, ou um dispositivo de hardware como *SigFox*, que envia o alerta via rede privada restrita.

4.5 PROTÓTIPO DO MONTERDC

Para prova de conceito, desenvolveu-se um Protótipo da Arquitetura MonTerDC, seguindo os requisitos obrigatórios descritos na arquitetura (Seção 4.3). Na Figura 11, encontram-se os cinco módulos da arquitetura implementados, associados aos protocolos de comunicação escolhidos. Os protocolos de comunicação entre os módulos são dependentes do hardware e, portanto, variam. Toda a interação do Administrador com o sistema se dá por Interface Web, através do protocolo HTTP. A comunicação entre Captores *IoT* Núcleo MonTerDC, Núcleo MonTerDC com 3D_View e API utilizam o protocolo TCP/IP baseado em troca de mensagens..

Figura 11 – Esquema de Comunicação entre os Módulos MonTerDC



Fonte: O autor

Os módulos desenvolvidos foram: Captores *IoT*, Núcleo MonTerDC, Alarme, 3D_View e API. O módulo Captores *IoT* é responsável pela coleta dos dados do ambiente do DC e envio das informações para o Núcleo MonTerDC. O protótipo conta com um único Captor *IoT* constituído de: (i) uma microcontroladora *Atmega328p*, marca Atmel, associada a uma controladora *Ethernet*, conectada a uma rede de 100Mbps guiada (cabos CAT5e); e (ii) capacidade de integração de até 20 sensores do tipo *LM35DZ*, com conexões guiadas individuais (cabos), e com precisão de $\pm 1^\circ\text{C}$.

Com capacidades de armazenamento e processamento limitadas, a função de cada Captor *IoT* restringe-se a aquisição das informações do ambiente de acordo com

as especificações parametrizadas pelo administrador. As características parametrizáveis são: tempo de captura, variação, quantidade de leituras e pré-processamento. As três primeiras características são valores inteiros correspondentes as necessidades ambiente e do administrador e, a última, um valor binário, com 0 para pré-processamento habilitado e 1, caso contrário. As faixas de valores e os comandos dos parâmetros encontram-se na Tabela 9.

Tabela 9 – Parametrização do Módulo Captores *IoT*.

Descrição	Comando	Valores	Observação
Tempo de Captura	time	0 a 60	5 Segundos (Padrão)
Variação	var	1, 2 ou 3	1 - Média (Padrão), 2 - Moda e 3 - Mediana
Qtde de Leituras	read	10 a 50	10 Leituras (Padrão)
Pré Processamento	proc	0 ou 1	0 - Processar (Padrão) ou 1 - Não processar

Fonte: O autor

Uma vez que a coleta foi efetuada, o Núcleo MonTerDC entra em ação. O Núcleo MonTerDC é capaz de controlar M Captores *IoT*, no protótipo desenvolvido, $M = 1$, pois o número de sensores suportados um único módulo Captores *IoT* é suficiente para cobrir os ambientes estudados.

No Middleware MonTerDC, o Núcleo MonTerDC foi desenvolvido na linguagem *PHP7*, servidor HTTP *Apache* (2.4.33), banco de dados *MySQL Community* (5.7.21) e está integrado ao Simulador CFD *Ansys CFX Academic Student* (18.1). O sistema de Alarme baseia-se na tecnologia *SigFox*, e possui hardware independente (*NXP Development Kit KL43Z/OM2385*). A versão preliminar da API conta, simplesmente, com as funções de obtenção das figuras do mapeamento térmico no formato XML. Embora, o protótipo esteja gerando o mapeamento térmico, a versão atual ainda não foi validada com um gerenciador de nuvem. O *3D_View* encontra-se operacional no website <<http://labp2d.joinville.udesc.br/monterdc/>>. No que se refere a comunicação, utilizou-se o método HTTP/GET para comunicação entre Captores *IoT* e Núcleo MonTerDC, REST para integrar o Núcleo MonTerDC a API, e, finalmente, *SPI* para Núcleo MonTerDC, Alarme e o Administrador do DC.

4.6 CONSIDERAÇÕES PARCIAIS

O monitoramento de um ambiente com concentração de equipamentos de Tecnologia da Informação (TI), como os DCs, possibilita ao administrador do sistema gerenciar de maneira eficiente os seus recursos. Entretanto, soluções comerciais têm custo elevado e são de difícil customização. Um dos possíveis impactos nos custos de soluções para monitoramento são os sensores (e.g., temperatura, umidade, pres-

são). Ao utilizar-se de um número maior de sensores, reduzindo a granularidade, e visando melhorar a fidelidade dos dados, o projeto de implantação torna-se demorado e custoso, em alguns casos, impossíveis. Por outro lado, basear-se somente em simuladores CFDs, garante granularidade extremamente fina sem a necessidade de sensores, porém perde-se a associação com a dinamicidade do ambiente real.

Identificado o cenário e as dificuldades de implantação, foram elencados os requisitos de projeto e descrita a proposta da Arquitetura MonTerDC, base da Solução IoT MonTerDC. A arquitetura proposta é modular, flexível e atua em ambientes de DC de pequeno e médio porte com refrigeração *não-CRAC*, ambientes pouco explorados na literatura. O Protótipo MonTerDC está operacional e os primeiros resultados permitiram constatar erros de projeto no ambiente estudado. Como consequência, o ambiente original foi adequado e os resultados seguintes permitiram melhorar a distribuição térmica, como pode ser observado nos experimentos apresentados no próximo capítulo.

5 EXPERIMENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Nos Capítulos anteriores, identificou-se a carência de monitoramento térmico em ambientes de *Data Center* (DC) de pequeno e médio porte com sistemas de refrigeração *não-CRAC*. A Solução *Internet of Things* (IoT) de Monitoramento Término de Data Centers (MonTerDC) apresenta-se como uma alternativa para este problema. Como prova de conceito, um protótipo da Arquitetura MonTerDC foi implementado e implantado em um ambiente de DC real (DC do *Laboratório de Processamento Paralelo e Distribuído* (LabP2D)), de pequeno porte e em operação desde 2013. Este mesmo ambiente foi reproduzido em escala em uma maquete acrílica. Finalmente, através de um conjunto específico de testes (cenários), pode-se monitorar o ambiente real com a Solução IoT MonTerDC, obtendo-se resultados preliminares do ambiente implantado em 2013. Após análise dos resultados e identificação de problemas, um novo projeto para o ambiente de DC do LabP2D foi elaborado, implantado e testado.

5.1 DESCRIÇÃO DO AMBIENTE DE TESTES

O *Laboratório de Processamento Paralelo e Distribuído* (LabP2D) está vinculado a *Universidade do Estado de Santa Catarina* (UDESC), campus Joinville. O LabP2D possui um espaço físico no andar térreo de um prédio de três andares, originalmente projetado para acolher uma sala de aula. O ambiente possui sistema de climatização tradicional do tipo *Split*¹, fonte geradora fria, com saída individual. Eles encontram-se localizados na parte superior da sala e o sistema de direcionamento do fluxo de ar é feito através de aletas.

Neste ambiente, o LabP2D abriga o seu DC de pequeno porte que conta atualmente com duas fileiras de máquinas servidoras do tipo torre e um *rack* de chão com três *switches* e três servidores de produção do tipo *rack*. Cada fila de servidores do tipo torre contam com 10 máquinas *HP Proliant* e, no *rack*, encontram-se os servidores de produção *Controller*, *Superserver* e *Huawei*. A descrição de recursos destes servidores (e.g., processamento, memória, armazenamento e sistemas operacionais) é apresentada na Tabela 10. Atualmente, este DC hospeda a Nuvem Tche cujo o gerenciador de recursos é o OpenStack (*Newton Release*).

Um protótipo operacional do MonTerDC² foi implantado no DC do LabP2D. O DC do LabP2D é classificado como de pequeno porte e conta com um sistema de refrigeração *não-CRAC*. O ambiente enquadra-se nas especificações da Arquite-

¹ Projeto 2013: *Split-1* (Electrolux - 30.000 btus); Projeto 2018: *Split-2* (Midea Inverter - 18.000 btus)

² Fontes disponíveis em <<https://github.com/ademircamillo/monterdc>>

Tabela 10 – Descrição dos Servidores LabP2D

Nome	Tipo	Sistema Operacional	Processador	RAM	HD	Fonte
HP Proliant	Torre	GNU/Linux Ubuntu 17.10	Processador AMD Phenom II X4 2.8GHz, 4 núcleos	8GB	500GB	450W
Controller	Rack	GNU/Linux Ubuntu 16.04	Processador 2x Intel(R) Xeon(R) CPU E5-2620 3.00GHz, 32 núcleos	32GB	1.8TB	700W
Huawei	Rack	GNU/Linux Ubuntu 16.04	Processador 2x Intel(R) Xeon(R) CPU E5-2620 2.50GHz, 24 núcleos	160GB	1.8TB	700W
SuperServer	Rack	GNU/Linux Ubuntu 16.04	Processador 2x Intel(R) Xeon(R) CPU E5-2620 2.60GHz, 24 núcleos	192GB	3.6TB	2 x 700W

Fonte: O autor

tura MonTerDC, contando com DC/LabP2D como infraestrutura de DC e Captores *IoT* como módulo de Hardware MonTerDC.

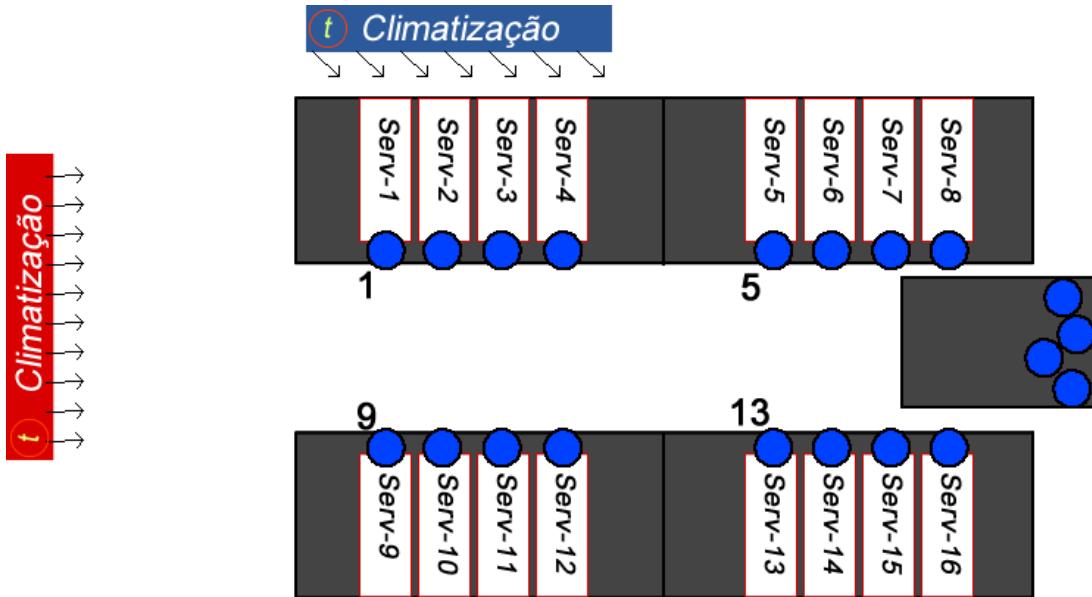
O projeto do DC do LabP2D implantado em 2013, com posicionamento físico de servidores e sistema de refrigeração, é descrito na Figura 12. Pode-se observar as duas fileiras de servidores do tipo torre, frente-a-frente, com suas fontes de calor direcionadas para o centro da sala, corredor quente. O *rack* de chão com quatro *switches* e três servidores de produção do tipo *rack* está posicionado neste mesmo corredor quente, a direita da sala. O DC conta com um único ponto de refrigeração, de 2013 a 2017, o responsável pela refrigeração era o aparelho do tipo Split-1 (30.000 btus, em azul na Figura 12), posicionado mais a esquerda, junto a parede externa da sala. Em 2018, o Split-1 foi substituído pelo Split-2 (18.000 btus, em vermelho na Figura 12) e tem sua evaporizadora posicionada na parede esquerda, frente ao corredor quente.

Os Captores *IoT* são formados por 20 sensores. Eles são nomeados de *s1* à *s20*, nos quais os 16 primeiros monitoraram as fontes geradoras de calor dos servidores torre e os quatro últimos o *rack* central. A numeração inicia-se com o sensor *s1*, posicionado a 5cm da fonte geradora de calor do servidor torre *Serv-1*, localizado mais a esquerda e acima na Figura 12. A sequência de nomes segue a numeração, incrementando 1 a cada servidor a direita deste primeiro até o *Serv-8* com *s8*, último da primeira linha. A mesma lógica segue para a linha inferior, sendo o mais a esquerda nomeado de *Serv-9* com *s9* e, o mais a direita, de *Serv-16* com *s16*. Os últimos quatro sensores, localizados no *rack*, foram nomeados de *s17*, *s18*, *s19* e *s20*.

5.2 MAQUETE DO DC LABP2D

O ambiente de DC do LabP2D é uma plataforma de produção para desenvolvimento de projetos de ensino, pesquisa e extensão da UDESC e região. O monitoramento térmico do ambiente com MonTerDC é não intrusivo, pois conta com equi-

Figura 12 – Projeto Físico do DC do LabP2D



Fonte: O Autor

pamentos especializados e dedicados. A implantação da Solução IoT MonTerDC no ambiente de DC do LabP2D não causa transtornos aos usuários. Todavia, ao longo do desenvolvimento do protótipo MonTerDC, surgiu a necessidade de deslocamento térmico provocado, com o intuito de observar o comportamento da ferramenta. Atuar diretamente no ambiente de produção impactaria nas aplicações dos usuários.

Tabela 11 – Descrição dos Componentes da Maquete LabP2D

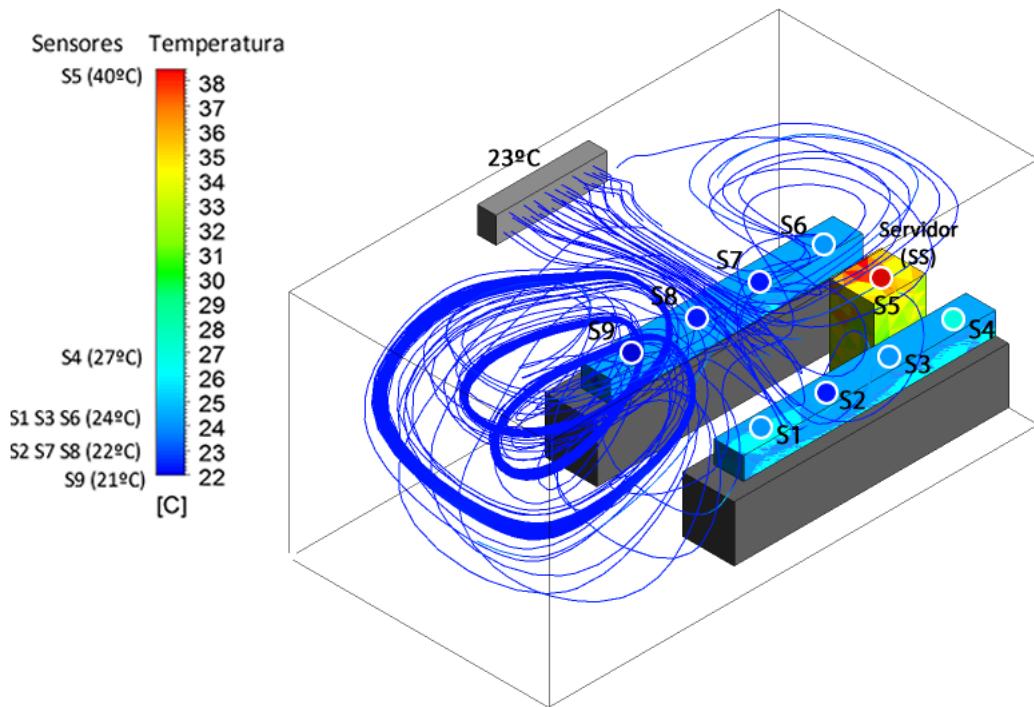
Item	Descrição
Refrigeração	Pastilha Peltier TEC1 – 12706 – 12V
Aquecimento	Resistor Térmico 5V
Sensor Temperatura	LM35DZ
Sensor de Umidade	DHT11
Display	Display LCD 20x4
Controle de Temperatura	Potenciômetro 100K
Alimentação	Fonte - 12V
Estrutura	Acrílico 6mm x 300mm x 450mm

Fonte: O autor

Neste contexto, visando agilidade e flexibilidade dos testes preliminares (*debug*) do protótipo MonTerDC, elaborou-se a Maquete do DC LabP2D (Tabela 11). A

Maquete foi construída em uma caixa acrílica na escala 1:11, com os equipamentos posicionados da mesma forma que no ambiente real. Os equipamentos foram representados por retângulos em papel com suas fontes geradoras de calor impulsionadas por resistores térmicos IoT. O sistema de refrigeração foi constituído de uma pastilha *Peltier* (*TEC1 – 1270612V*), representando o condensador (externo ao ambiente), e uma evaporizadora (ventilador controlado por um potenciômetro), que permite a variação térmica na entrada do DC. A Solução IoT MonTerDC implantada na maquete é a mesma do ambiente real, restrita, simplesmente, pelo número de sensores, nove neste caso.

Figura 13 – Comparação Maquete MonTerDC



Fonte: O autor

A maquete possibilitou a primeira implantação da Solução IoT MonTerDC e a análise preliminar de um ambiente de teste. Com ela, pode-se acompanhar, visualmente e *on-line*, através da Solução IoT MonTerDC, o deslocamento térmico provocado no ambiente real em escala. Botões permitem acionar os capacitores, que representam aumento de carga de processamento nos servidores, e consequentemente, a alteração das zonas térmicas no ambiente de DC. Na maquete, os 9 sensores de temperatura foram posicionados nos locais onde encontram-se as fontes dos servidores no ambiente real. Os sensores foram nomeados de *s1* a *s9*, iniciando no primeiro

servidor torre abaixo a esquerda e, incrementando-se 1 ao nome de cada sensor associado a um servidor a direita. O componente central representa os servidores *rack* e tem o sensor *s5*. A fila superior inicia com o sensor *s6*, acima a direita, e, finaliza, no último servidor torre com *s9*, mais a esquerda.

Para exemplificar, escolheu-se, aleatoriamente, um dos cenários testados, ilustrado na Figura 13. Neste cenário, os dados dos sensores são repassados diretamente como parâmetros do componente **Simulador Computational Fluid Dynamics (CFD)** (módulo Núcleo MonTerDC) associado a Solução IoT MonTerDC. O sistema de refrigeração foi configurado a 23°C e o *rack* a 50°C. O resultado deste teste, com a aplicação do Protótipo MonTerDC a maquete, permitiu identificar visualmente, pela primeira vez neste ambiente, a distribuição das correntes de ar frio e a concentração de zonas térmicas a direita do ambiente. Cumprindo seu propósito, a maquete permitiu a aplicação de inúmeros cenários, sem atrapalhar os usuários do ambiente de DC do LabP2D, além de ter sido utilizada em apresentações do projeto em eventos. No entanto, a análise da Protótipo MonTerDC a uma maquete não era suficiente para a validação do trabalho.

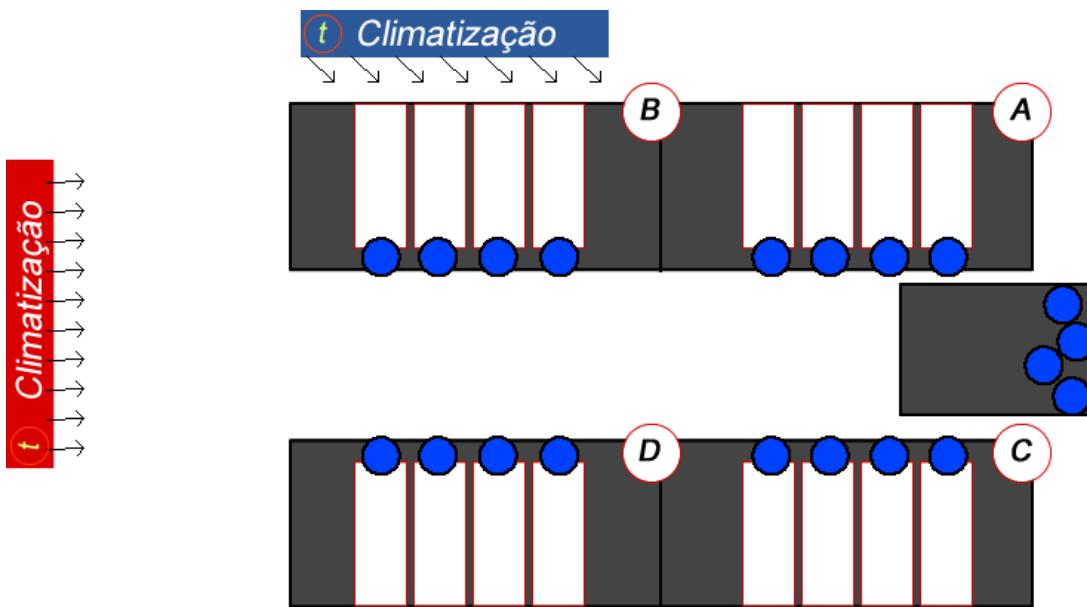
5.3 DESCRIÇÃO DOS EXPERIMENTOS

Dentre uma dezena de cenários aplicados a maquete, escolheu-se os cenários críticos para teste no ambiente real. Foram definidos seis cenários, com o objetivo de variar a carga de processamento dos servidores em torre (distribuídos no DC do LabP2D) deslocando a região concentrada de calor de uma ponta a outra do ambiente. Esses cenários foram projetados para facilitar a observação da formação de zonas térmicas fora das normas (21°C a 25°C) (ASHRAE, 2016) e avaliar o impacto do deslocamento de temperatura no consumo total de energia do DC.

Para caracterizar a formação de zona térmicas, foram utilizados blocos de processamento, formados pelos servidores tipo torre, sendo cada bloco constituído por quatro servidores *HP Proliant*. Os quatro blocos de processamento (Figura 14) são nomeados Bloco: *A*, *B*, *C* e *D*. As posições dos sensores estão representadas pelos círculos azuis. Os primeiros testes foram efetuados com o sistema de refrigeração (Split-1) implantado no ambiente de DC do LabP2D em 2013 (em azul). Os testes seguintes utilizaram o sistema de refrigeração (Split-2) implantado em 2018 (em vermelho).

Os cenários são caracterizados pela ativação e desativação dos blocos. Cada cenário possui somente dois blocos de processamento ativos, variando as combinações de blocos ativos, tem-se os seis cenários definidos. Os blocos ativos são aqueles com a carga de trabalho dos quatro servidores em 100%, e blocos inativos, são blocos

Figura 14 – Blocos de Processamento



Fonte: O Autor

no quais os servidores estão ligados, porém com carga de trabalho a 0%. Os servidores de rack, localizados entre as colunas de servidores de torre, possuem carga de trabalho constante (em 50%), que permanece inalterada em todos os cenários. O controle de carga de trabalho foi obtida com a ferramenta *Stress-NG*³, ferramenta *open source* para sobrecarga de recursos físicos de computadores, que permite configurar a quantidade e a taxa de utilização de cada núcleo.

Cada cenário tem a duração de 60 min, sendo que, nos primeiros 30 min, a climatização foi regulada para 23°C, e nos últimos 30 min para 18°C. A cada troca de cenário, estipulou-se um período de resfriamento de zonas de 15 min, no qual todos os blocos estão inativos (carga de trabalho a 0%). A distribuição dos blocos ativos que compõe os cenários são:

- (i) *Cenário 1* tem os blocos *A* e *B* ativos;
- (ii) *Cenário 2* tem os blocos *A* e *D* ativos;
- (iii) *Cenário 3* tem os blocos *A* e *C* ativos;
- (iv) *Cenário 4* tem os blocos *C* e *D* ativos;
- (v) *Cenário 5* tem os blocos *B* e *C* ativos; e

³ Mais informações em <<http://kernel.ubuntu.com/~cking/stress-ng/>>

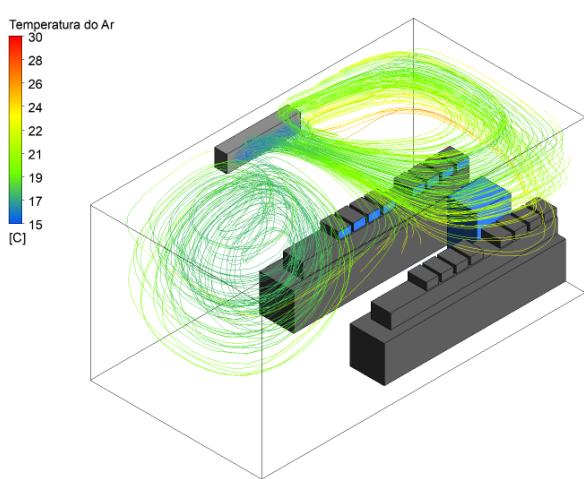
(vi) Cenário 6 tem os blocos *B* e *D* ativos.

A implantação dos sensores no Protótipo MonTerDC seguiu as especificações da Arquitetura MonTerDC (Seção 4.2).

5.4 EXPERIMENTAÇÃO E RESULTADOS

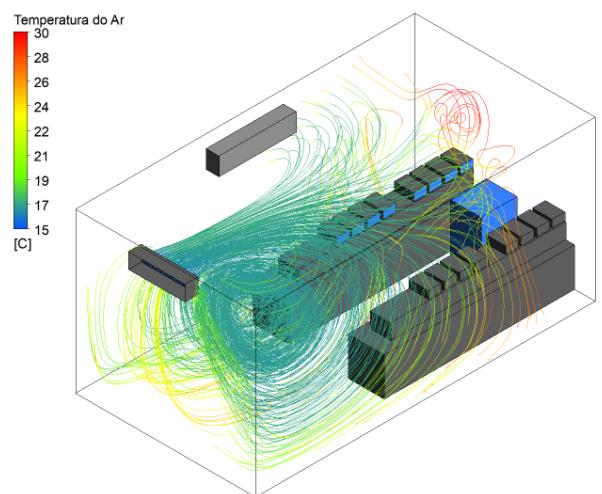
A formação de zonas térmicas sofre influência de vários fatores (e.g., taxa de utilização dos recursos, regulagem da climatização, entre outras) e a identificação destas zonas em um ambiente de DC é uma tarefa complexa (MALIK et al., 2017). Medir a temperatura em um único ponto do DC não permite a caracterização térmica de todo ambiente e, preencher todo o ambiente com sensores é inviável.

Figura 15 – Correntes de ar DC do LabP2D Split-1.



Fonte: O Autor

Figura 16 – Correntes de ar DC do LabP2D Split-2.



Fonte: O Autor

Para entender o deslocamento das zonas térmicas em função das fontes geradoras de calor faz-se necessária a identificação das correntes de ar da única fonte geradora fria (climatização a 2,2m do chão). O resultado, com o Split-1, disponibilizado pelo 3D_View (Figura 15) traça o fluxo de ar gerado pela climatização, indicando que a maior concentração de ar está focada no lado direito da sala, onde está instalado o *rack*. Isso ocorre porque as aletas da climatização estão posicionadas para este lado da sala. É possível identificar duas áreas frias, uma mais densa à direita e outra mais amena à esquerda. A área fria à direita pode ser descrita por um círculo vazado. Pode-se ainda afirmar que as correntes frias descem em direção a concentração de servidores próximos a parede direita.

Com a alteração do local da fonte geradora de frio, Split-2, o resultado disponibilizado pelo 3D_View (Figura 16) traça o fluxo de ar gerado pela climatização. Isso ocorre porque as aletas da climatização estão posicionadas para frente da sala, na nova posição do climatizador, ao lado esquerdo. É possível identificar que a corrente de ar percorre o centro da sala e depois se espalha para os lados. Nota-se também que o fundo da sala não recebe fluxo de ar diretamente do climatizador, aspecto esse, que será visível na análise das zonas térmicas na sequência do trabalho. Nota-se também, que a parte mais refrigerada pelo fluxo do *Split-2* não possui equipamentos e servidores.

Uma vez analisada as correntes de ar frio no DC, pode-se analisar o comportamento térmico dos blocos e a formação de zonas térmicas. Esta análise será aplicada aos seis cenários definidos na Seção 5.3. A cada cenário aplicou-se duas regulagens distintas do sistema de refrigeração, a primeira a 23°C e a segunda a 18°C. Variou-se ainda o tipo e posição da evaporadora do sistema de refrigeração, Split-1 e Split-2. As Figuras 17 à 28 são compostas de três imagens:

- (a) com representação térmica do DC no momento de pico (temperatura máxima) e com a climatização regulada a 23°C;
- (b) com momento de pico e climatização regulada a 18°C; e
- (c) com o gráfico das temperaturas obtidas ao longo do período de 60 minutos.

A análise das Figuras (a)s e (b)s é visual e a escolha do pico é para representar o pior caso. Em todas as figuras escolheu-se o mesmo ângulo de visualização para facilitar a comparação entre as zonas térmicas geradas em (a) com aquelas geradas em (b) e, seguir o mesmo ângulo apresentado no esquema de distribuição de sensores da Figura 14 (blocos de processamento). Embora a ferramenta disponibilize imagens 3D, o ângulo com melhor definição das zonas térmicas, neste caso, foi da visão superior plana (2D). Isso ocorre porque as correntes de ar frio chegam pelo alto e descem, enquanto as correntes de ar quente são geradas mais próximas do chão e sobem. A formação de zonas térmicas é representada nas figuras de acordo com uma escala de cores, iniciando-se em azul (20°C), passando pelo verde (22°C), amarelo (23°C), laranja (25°C) e, finalizando-se em vermelho (33°C).

5.4.1 Cenário 1 - Split 1

O resultado do mapeamento térmico com o pico de temperatura do Cenário 1 encontra-se nas Figuras 17(a) e 17(b). Este cenário se caracteriza pela geração constante de calor nos blocos *A* e *B* (Figura 14), que estão lado a lado e localizados na coluna superior de servidores, mais próxima da climatização. O primeiro mapeamento

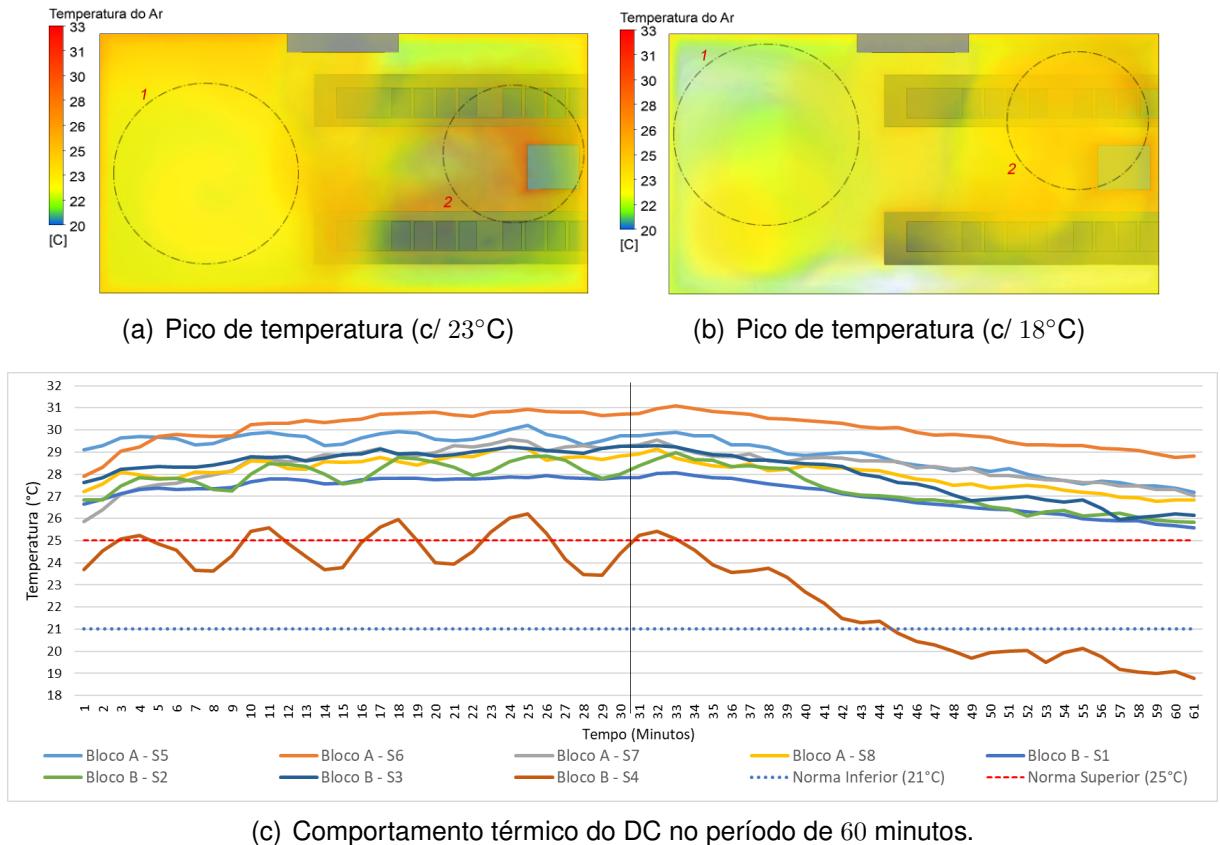


Figura 17 – Cenário 1: blocos de processamento *A* e *B* ativos.

(Figura 17(a)), com refrigeração regulada a 23°C, todo o ambiente está quente, apresentando uma zona térmica amarela com alguns pontos pigmentados de laranja (à esquerda do ar-condicionado) e ponto central vermelho (à direita).

O segundo mapeamento (Figura 17(b)), com refrigeração regulada a 18°C, modifica as zonas térmicas, reduzindo a área de abrangência da zona térmica amarela e sua intensidade, chegando a apresentar alguns pontos esverdeados, à esquerda, e tornando a zona vermelha em amarela pigmentada de laranja (à direita). É possível observar exatamente os dois pontos de concentração de calor, centro dos Blocos de processamento *A* e *B*.

Os sensores dos blocos de processamento (*s1* a *s7*) seguem o mesmo comportamento entre si, que compreende um aumento de em torno de 2°C do tempo 1 ao 30, primeira fase, e uma redução na mesma magnitude nos tempos 31 a 60. A única exceção é o Sensor *s8* Bloco *A* que é a primeira fonte de calor a receber a corrente de ar frio (ver correntes de ar da Figura 15), mantendo-se sempre com temperaturas abaixo das demais. Mesmo em situação privilegiada, a temperatura obtida neste sensor é superior a norma (ASHRAE, 2016) em 5 picos (4, 11, 18, 25 e 32). A partir do

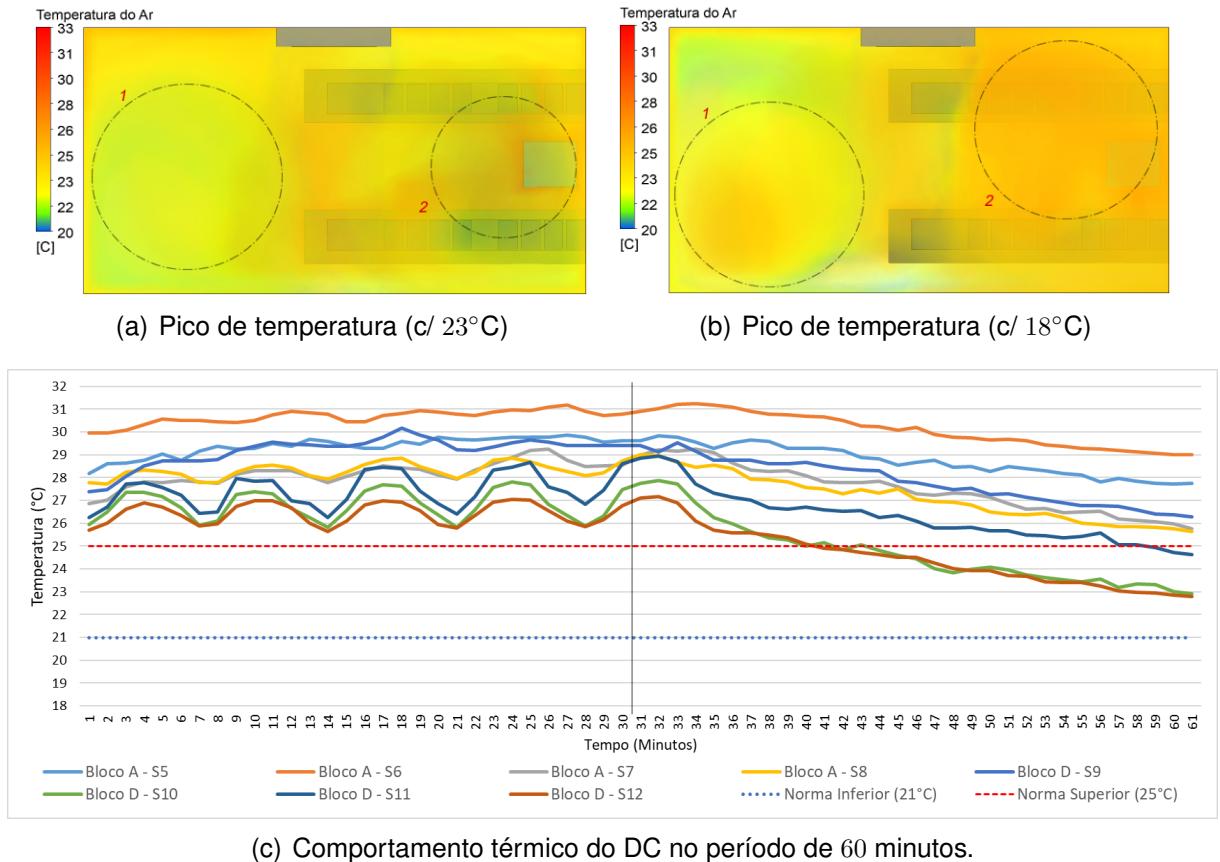


Figura 18 – Cenário 2: blocos de processamento A e D ativos.

tempo 45, a temperatura neste ponto (Sensor s_8 Bloco A) é inferior a recomendada pela norma, enquanto os demais sensores permanecem acima do recomendado. A Figuras 17(a) e 17(b) apresentam estes dois pontos de concentração de ar quente.

5.4.2 Cenário 2 - Split 1

O Cenário 2 (Figura 18) altera a localização física de uma das fontes geradoras de calor, o Bloco A torna-se inativo e o Bloco D passa a ativo. O Bloco D está localizado em frente ao bloco B. Com esta alteração, pode-se observar (Figura 18(a) e 18(b)) que o ambiente de DC do LabP2D apresentou zonas térmicas mais homogêneas com tons laranja. O bloco D está melhor refrigerado do que o bloco B, pois ele está em frente a corrente de ar frio (Figura 15). Embora o comportamento individual dos sensores (Figura 18(c)), se comparado com o cenário 1 (Figura 17(c)), tenha sido mais ameno, a distribuição do mapa térmico mostrou, visualmente, o predomínio generalizado no ambiente do laranja.

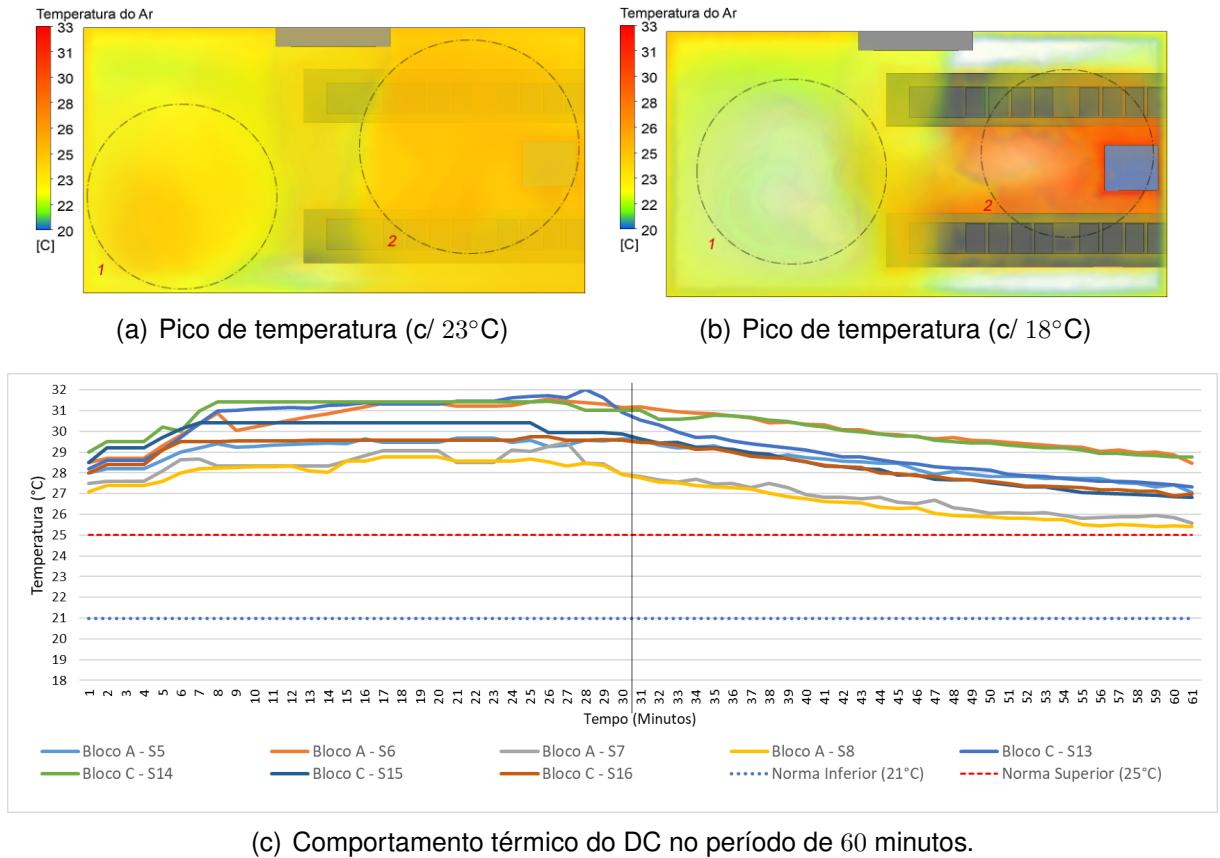


Figura 19 – Cenário 3: blocos de processamento *A* e *C* ativos.

5.4.3 Cenário 3 - Split 1

No Cenário 3 (Figura 19), os dois blocos de processamento ativos são *A* e *C*, localizados em colunas distintas, porém ambos à direita da climatização. No primeiro mapeamento térmico (Figura 19(a)), com refrigeração a 23°C, pode-se observar dois pontos leves de concentração de calor, um com amarelo e outro com laranja predominante, sendo que o amarelo à esquerda esta levemente circundado de verde.

Na Figura 19(b), observa-se duas zonas térmicas com extremos, à direita temperaturas amenas com o centro amarelo claro e, à esquerda, no qual encontra-se o *rack*, zonas térmicas extremamente quentes com tons fortes de vermelho. Esta discrepância ocorre devido ao posicionamento do termostato da climatização.

Ele encontra-se próximo a zona térmica com temperaturas amenas ($\sim 21^\circ\text{C}$) e, como está regulado para 18°C, reduz a potência do compressor. Como consequência, a refrigeração da zona à esquerda é prejudicada. As temperaturas observadas diretamente nos sensores dos Blocos *A* (*s5* à *s8*) e *C* (*s13* à *s16*) mantiveram-se acima da norma durante todo o período observado, e os sensores do *rack* (*s17* à *s20*) chegaram aos valores de 32°C, 34°C, 33°C e 34°C.

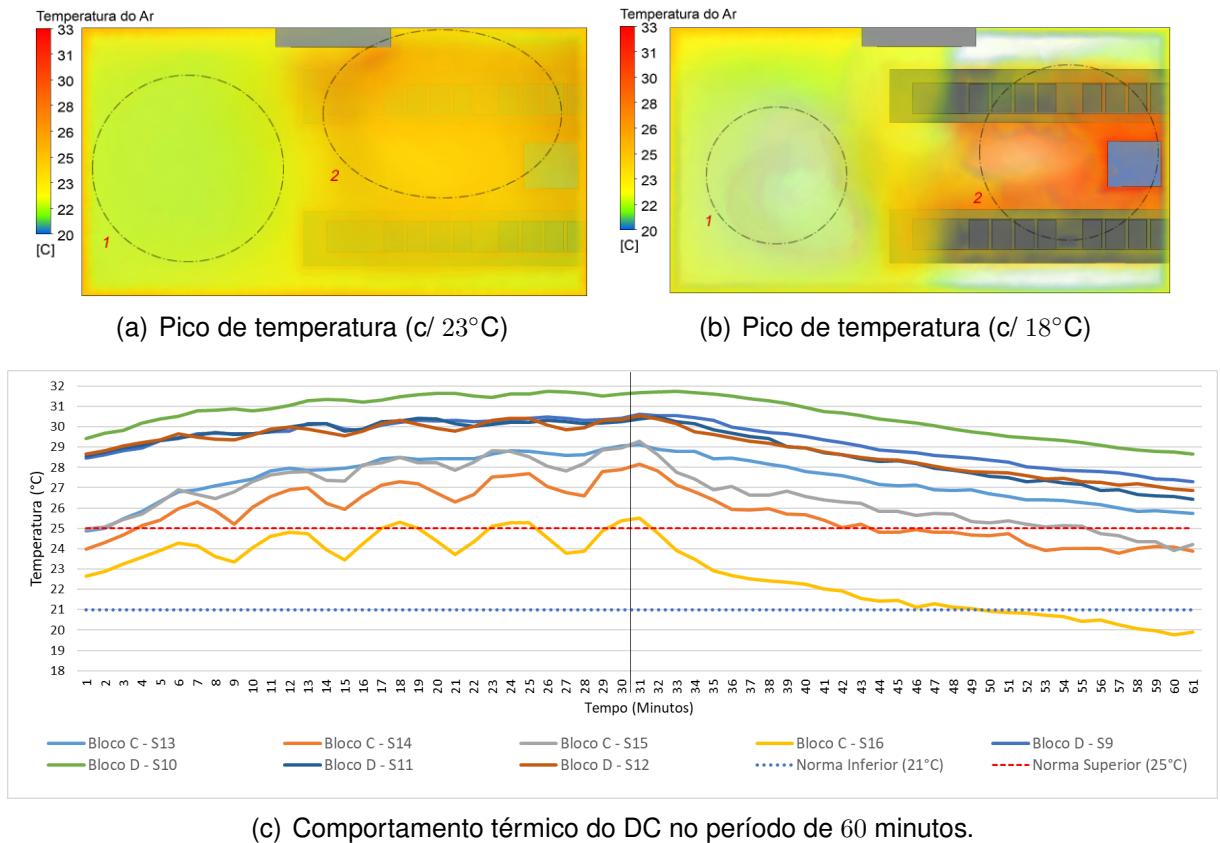


Figura 20 – Cenário 4: blocos de processamento *D* e *C* ativos.

5.4.4 Cenário 4 - Split 1

No Cenário 4 (Figura 20) o comportamento é semelhante ao identificado para o Cenário 3. Neste caso, os dois blocos de processamento ativos são *D* e *C*, localizados na mesma coluna, em frente a climatização.

Com a temperatura a 23°C, Figura 20(a), diferente do cenário anterior, encontra-se uma área verde, localizada a esquerda da saída de ar do sistema de refrigeração. Entretanto, esta área não possui equipamentos, sendo uma área de passagem. No outro lado da sala, devido a concentração do processamento nos blocos *D* e *C*, identifica-se a área 2 com tons laranja escuro, acima da norma recomendada.

Ao alterar a temperatura para 18°C, Figura 20(b), identifica-se, nas extremidades da sala, 2 áreas em verde, uma direita e outra a esquerda, semelhante aos testes com 23°C. Embora com temperatura média da sala inferior ao caso com 23°C, pode-se visualizar ainda áreas em vermelho, ou seja, acima da norma, próximo aos servidores ativos.

Analizando a Figura 20(c), identifica-se um padrão nos sensores com temperatura mais alta (S10 à S13 e S15) onde o aumento da temperatura é linear até chegar

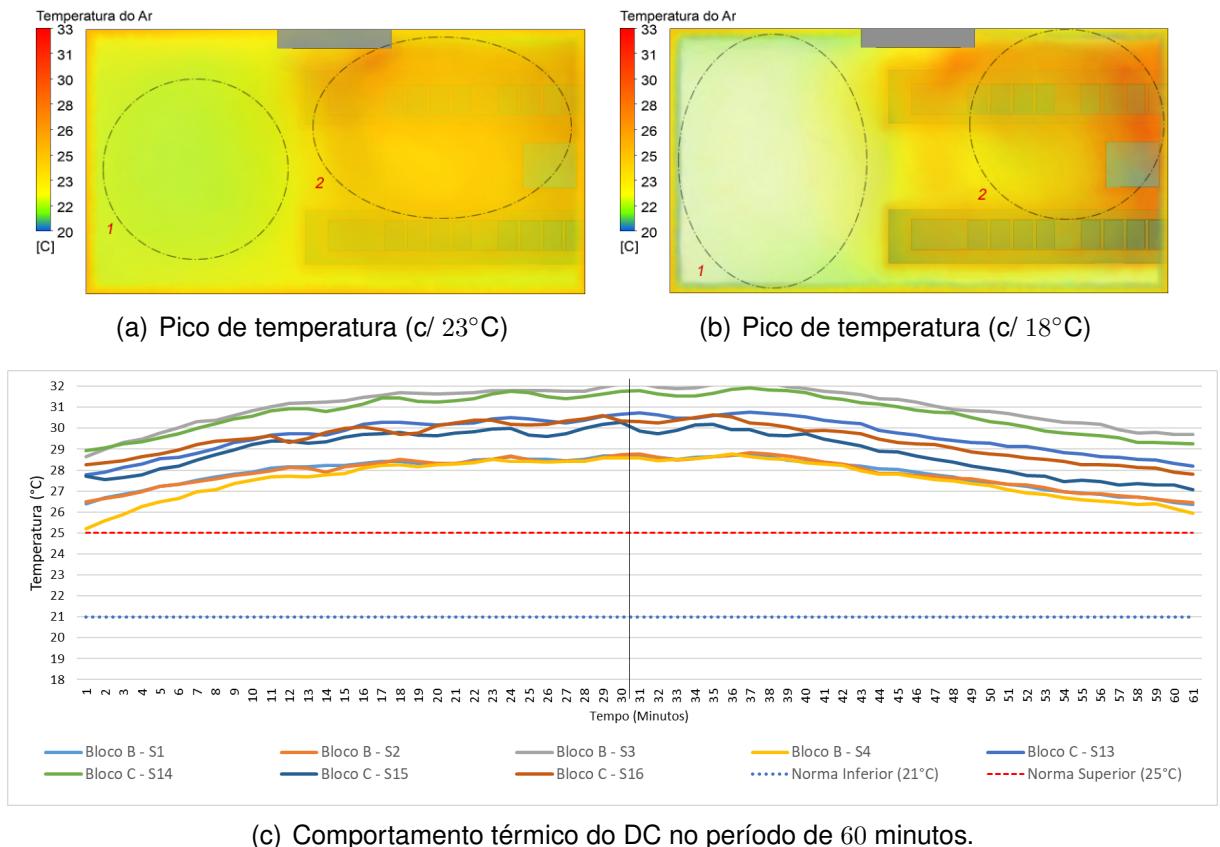


Figura 21 – Cenário 5: blocos de processamento *B* e *C* ativos.

no maior valor. Ao alterar a temperatura para 18°C também identifica-se a redução da temperatura semelhante ao aquecimento. Nos sensores *S*14 e *S*16 o aquecimento apresenta picos com altas e baixas, devido ao sistema de refrigeração ligar e desligar o compressor.

5.4.5 Cenário 5 - Split 1

No Cenário 5 (Figura 21) os blocos de processamento ativos são *B* e *C*, localizados em colunas diferentes, o bloco *B*, abaixo da climatização e o bloco *C* no canto ao fundo da sala. Na primeira parte do teste, com a temperatura a 23°C, o Cenário 5 apresenta a formação das zonas térmicas idênticas ao Cenário 4, com uma área verde, sem equipamentos e uma concentração de zonas amarelo e laranja, próximo aos servidores.

Nos testes com a temperatura a 18°C, nota-se a área em verde com maior abrangência e uma borda inferior em verde. As áreas com zonas térmicas acima da norma, apresentadas em laranja, ficam concentradas no canto superior da sala, próximo ao *rack* com os servidores. Entretanto, diferente dos Cenários 4 e 5, não é iden-

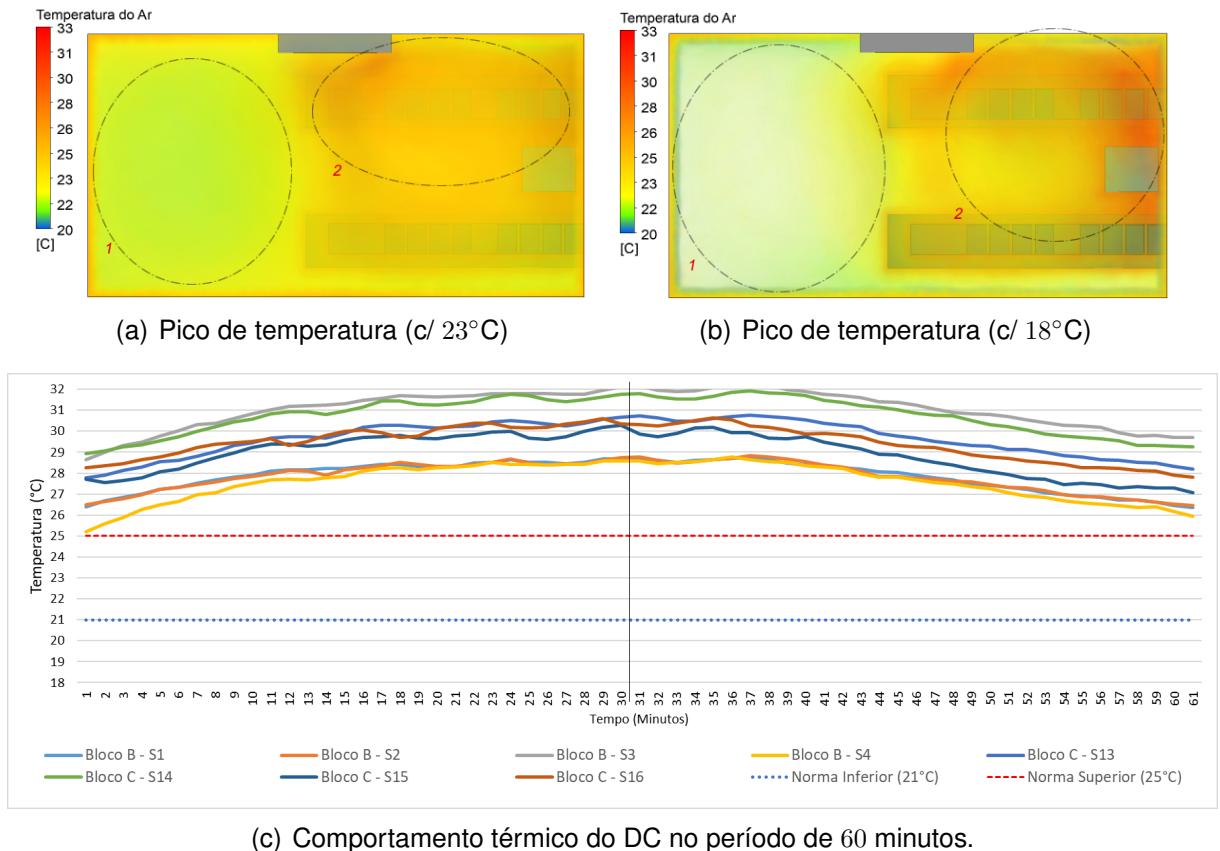


Figura 22 – Cenário 6: blocos de processamento *B* e *D* ativos.

tificado zonas em vermelho, maior temperatura observada nos anteriores.

O comportamento de aumento da temperatura, apresentado na Figura 21(c), mostra um crescimento equivalente em todos os sensores, com aumento de aproximadamente 2°C. Sendo que, todos os sensores já identificavam temperatura acima da norma, mesmo antes de iniciar o teste. Mesmo ao final dos 30 minutos com temperatura a 18°, todos os sensores ainda se apresentavam acima da norma.

5.4.6 Cenário 6 - Split 1

Por último, o Cenário 6 (Figura 22) os blocos de processamento ativos são *B* e *D*, localizados em colunas diferentes, ambos no lado direito da sala, próximo ao rack de servidores. Com a temperatura a 23°C, identifica-se a esquerda da climatização, área sem equipamentos, uma zona térmica verde, bem como as bordas em cima e abaixo da sala. Na área central, onde localizam-se os servidores, identifica-se uma zona térmica predominante em laranja e ao redor uma zona vermelha. Ambas acima da norma e com diversos pontos avermelhados, representando área com a temperatura próxima a 30°C.

Observando o cenário com a temperatura a 18°C, identifica-se praticamente os mesmos problemas. Referente as zonas verdes, a área observada é maior, entretanto, as zonas quentes, alaranjadas e vermelhas, apresentam-se as mesmas.

Finalmente o comportamento dos Cenários 5 (Figura 21) e 6 (Figura 22) permite acompanhar visualmente o deslocamento das zonas térmicas e sobretudo a identificação dos pontos de concentração de calor. Com as Figuras 21(a) e 22(a) pode-se visualizar o impacto da temperatura com a climatização a 23°C, insuficiente para manter o ambiente de DC nas especificações das normas e, as Figuras 21(b) e 22(b) permitem concluir que mesmo reduzindo a temperatura total do ambiente a distribuição de ar no DC do LabP2D não garante o resfriamento de todas as áreas do ambiente. Com a regulagem da climatização a 18°C tem-se uma situação curiosa, pois o lado esquerdo da sala atinge os menores patamares de temperatura, mesmo assim, à direita da climatização as temperaturas permanecem acima da norma.

5.4.7 Cenário 1 - Split 2

Após os cenários apresentados com o sistema de refrigeração Split-1, foi realizada a mesma sequência de testes com o novo climatizador (Split-2), apresentado abaixo. Além da mudança da posição do evaporador, como apresentado anteriormente, este sistema é do tipo *inverter*, que ao contrário do anterior, mantém o compressor ligado permanentemente, controlando a temperatura, evitando picos de consumo de energia e alterações da temperatura do ar que sai do equipamento.

Devido a mudança do posicionamento do sistema de refrigeração, observa-se nas Figuras 23 à 28 a formação de uma área sem zonas térmicas indesejáveis, diretamente a frente da saída do ar frio. Entretanto, no lado oposto, no fundo da sala, pode-se identificar em praticamente todos os cenários, zonas térmicas fora das normas.

No Cenário 1, com os blocos *A* e *B* ativos, localizados a esquerda do sistema de climatização, identifica-se nas duas temperaturas (18°C e 23°C) uma zona fria próxima a saída de ar e no lado oposto, a formação de zonas térmicas indesejadas. A diferença neste cenário, comparando-se as duas temperaturas, são as bordas da sala e os corredores ao redor dos servidores, que, em 18°C está aproximadamente 2°C menor.

Observando a Figura 23(c), nota-se que não ocorre o efeito onda, que aconteceu anteriormente nos cenários com o sistema de refrigeração Split-1. Este efeito ocorre devido ao compressor ser desligado e depois religado novamente, principalmente nos momentos que a temperatura do ambiente atinge o valor definido no termostato. Neste caso, como o sistema não desliga o compressor, a temperatura se

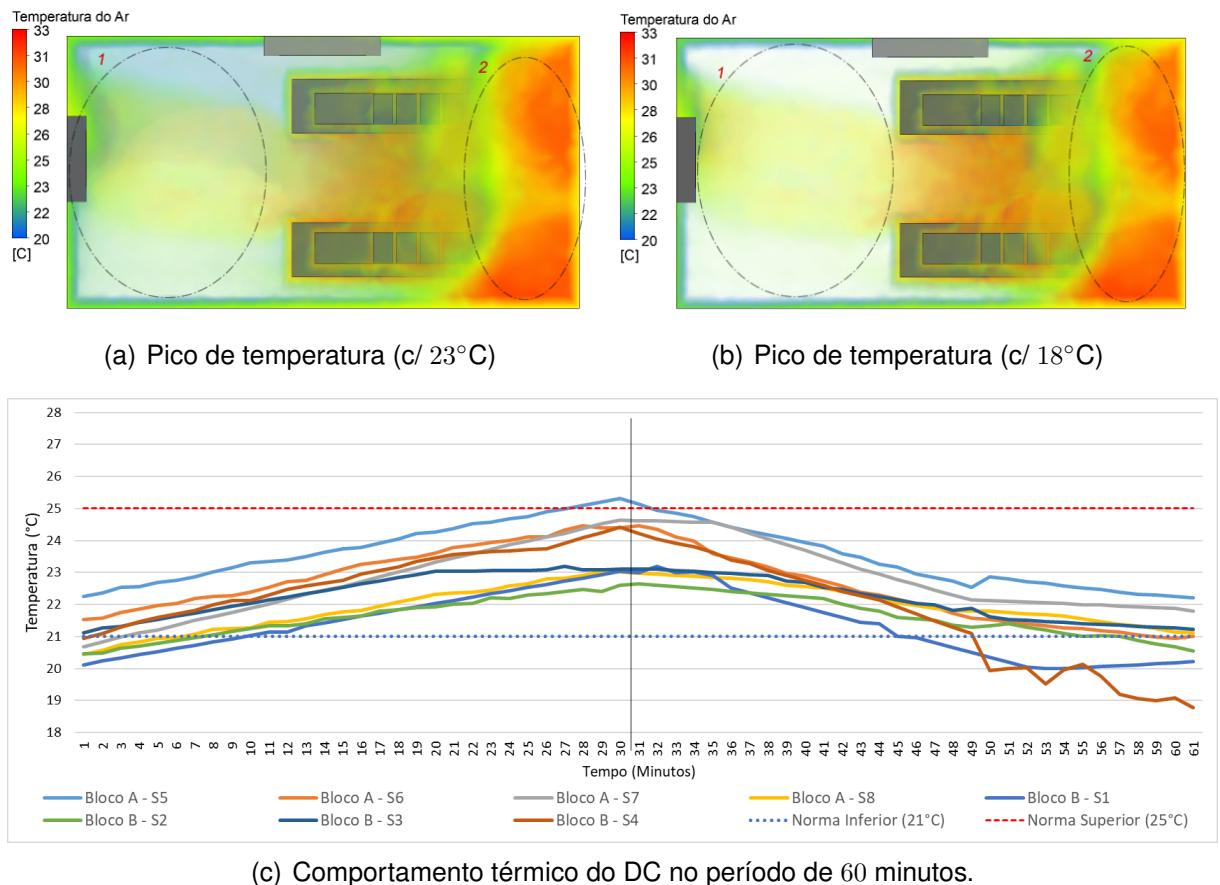


Figura 23 – Cenário 1: blocos de processamento *A* e *B* ativos.

mantém constante e não sofre oscilações.

5.4.8 Cenário 2 - Split 2

No Cenário 2, os blocos *A* e *D* estão ativos. O bloco *D* fica diretamente a frente do sistema de refrigeração enquanto o bloco *A* fica no fundo da sala. O comportamento neste cenário é bastante semelhante ao cenário 1, deixando uma coluna de ar frio no centro da sala e uma zona de ar quente ao fundo. Analisando os testes em temperaturas diferentes (Figura 24(a) e Figura 24(b)), o efeito da redução da temperatura não afeta diretamente a área onde os servidores estão localizados.

Observando a Figura 24(c), nota-se que mesmo depois de configurada a temperatura em 18°C aos 30 minutos, a temperatura demora 4 à 5 minutos para começar a diminuir, mantendo-se estável por esse período de intervalo.

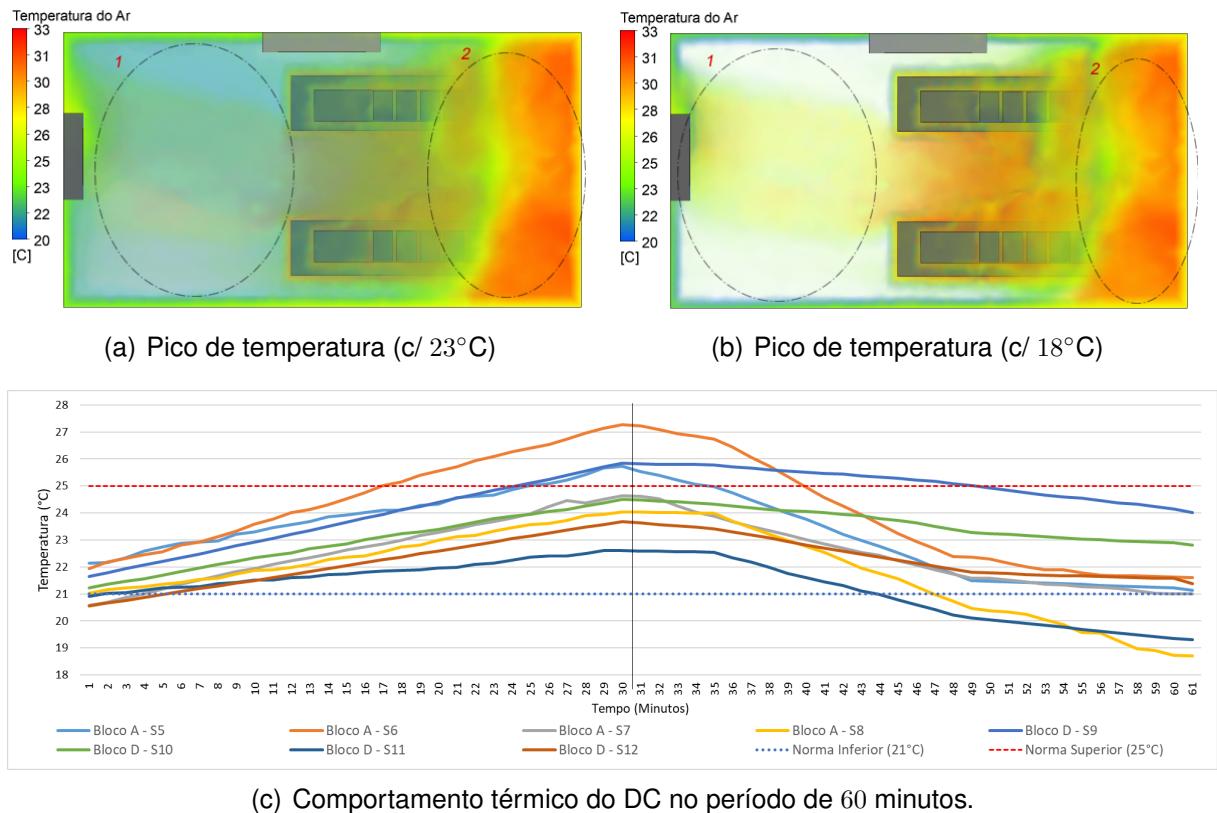


Figura 24 – Cenário 2: blocos de processamento *A* e *D* ativos.

5.4.9 Cenário 3 - Split 2

No cenário 3, apresentado na Figura 25, os blocos *A* e *C* estão ativos, no fundo da sala, opostos ao climatizador. O comportamento esperado eram áreas vermelhas mais fortes e uma dispersão menor do calor próximo aos servidores. Entretanto, na análise térmica, pode-se observar que no teste a 23°C, criou-se duas zonas avermelhadas, separadas e uma maior dispersão do calor próximo ao meio da sala, deixando praticamente todo o ambiente dos servidores a uma temperatura de no mínimo 26°C.

Ao analisar o teste a 18°C, observa-se o mesmo comportamento, porém com o aumento das zonas laranjadas percorrendo todo o corredor entre os servidores. Nota-se que nos dois testes, a área a esquerda, próximo ao climatizador está com a temperatura abaixo dos 21°C, também fora da norma.

Na Figura 25(c) destaca-se a equalização da temperatura, já observada no cenário anterior, entre o processo de resfriamento, dos 30 até os 36 minutos. Neste período a temperatura diminui de maneira mais lenta, mesmo quando o sistema de refrigeração já está na nova temperatura. Ainda neste gráfico, no minuto 48 em diante, identifica-se que a temperatura, apesar de continuar diminuindo, está estabilizada, apontando que a temperatura da sala iria se manter nesta faixa, mesmo o teste du-

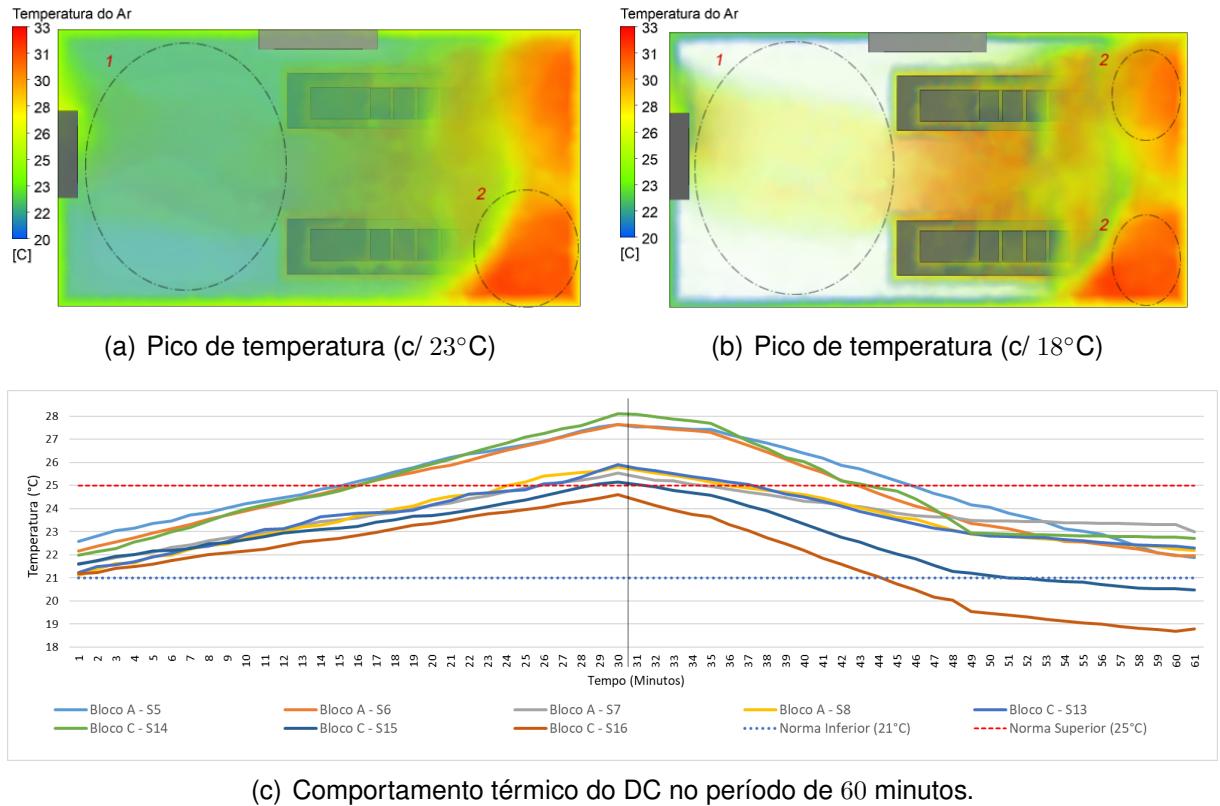


Figura 25 – Cenário 3: blocos de processamento *A* e *B* ativos.

rando mais tempo. Neste sentido, 6 sensores estariam dentro da norma e apenas 2 (Sensores 15 e 16 no Bloco C) ficariam abaixo e consequentemente fora da norma.

5.4.10 Cenário 4 - Split 2

No cenário 4, apresentado na Figura 26, os blocos *C* e *D* estão ativos e estão localizados na parte inferior da sala, sendo o bloco *D* próximo a saída de ar e o bloco *C* no fundo da sala. Neste caso, com a temperatura da sala em 23°C, as zonas térmicas alaranjadas foram direcionadas para o fundo, criando uma área quente na parte superior que se estende até embaixo, com maior temperatura e volume na parte inferior.

Com o teste em 18°C, o comportamento é semelhante, porém observa-se uma zona de ar frio entre o corredor dos servidores e a zona de ar quente no fundo da sala. Esse comportamento originou uma nova zona quente, na região próxima aos servidores do bloco *D*. Em contra partida, as bordas da sala e a região entre as duas zonas quentes observadas estão com a temperatura próxima a 20°C, entretanto, em uma região que não possui equipamentos.

Na Figura 26(c), após a temperatura da sala estar equilibrada, 48 minutos em

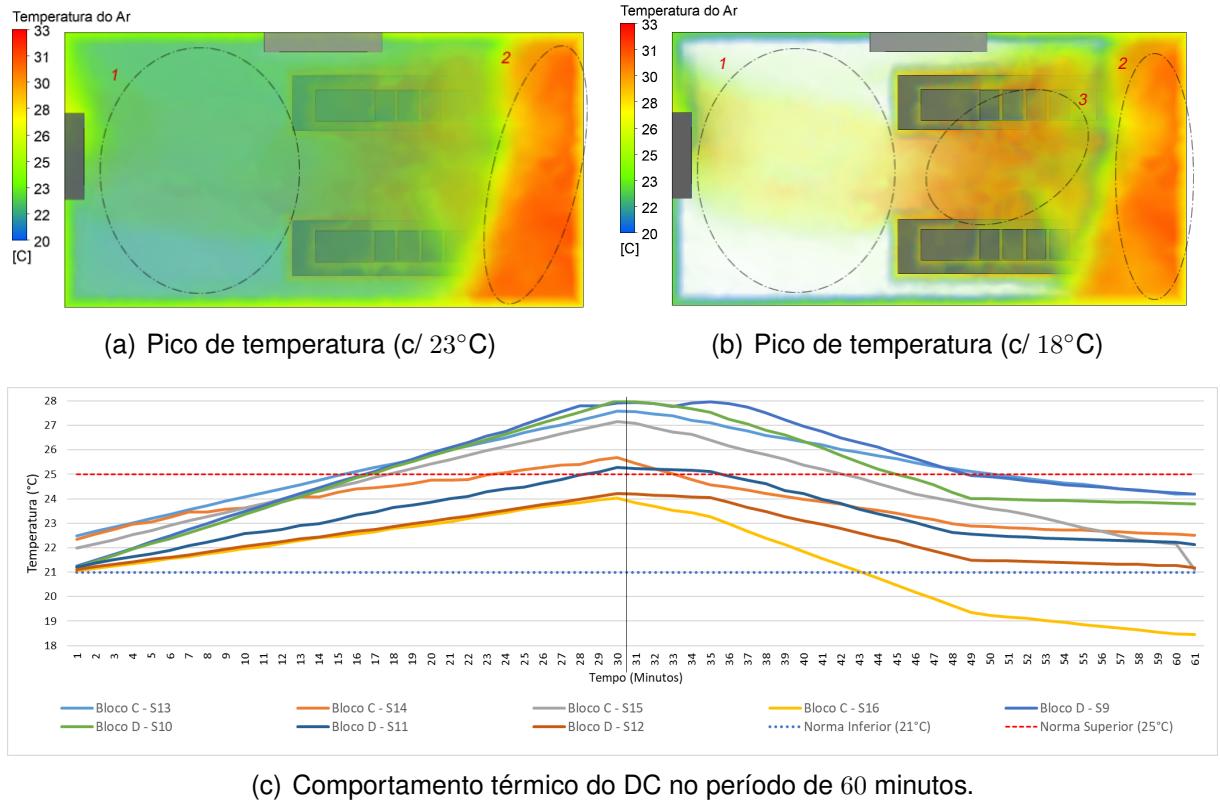


Figura 26 – Cenário 4: blocos de processamento *A* e *B* ativos.

diante, a temperatura de todos os sensores, exceto o sensor 16 no bloco *C*, estão dentro da norma, aspecto semelhante observado no minuto 1, antes do teste.

5.4.11 Cenário 5 - Split 2

No cenário 5, apresentado na Figura 27, os blocos *B* e *C* estão ativos, sendo assim, o espelho do cenário 2. Entretanto, o comportamento das zonas térmicas não é idêntico. Observa-se que em 23°C predominou duas zonas térmicas vermelhas nos dois cantos ao fundo da sala, porém com menor intensidade do cenário espelhado e com zonas verdes nas demais áreas, dentro da norma.

Com o climatizador à 18°C, nota-se que áreas que antes estavam dentro da norma, agora estão com uma zona avermelhada, no corredor entre os servidores, próximo ao bloco *B*. Da mesma maneira que apresenta uma zona térmica verde, de cima a baixo da sala, entre as zonas quentes.

Ao analisar a Figura 27(c), observa-se o mesmo comportamento da climatização, com estabilização depois da troca da temperatura e no final do teste, quando a temperatura se estabiliza. Comparando aos cenários do Split-1, essa característica não era observada, porém, eram identificados picos e baixas de temperatura, devido

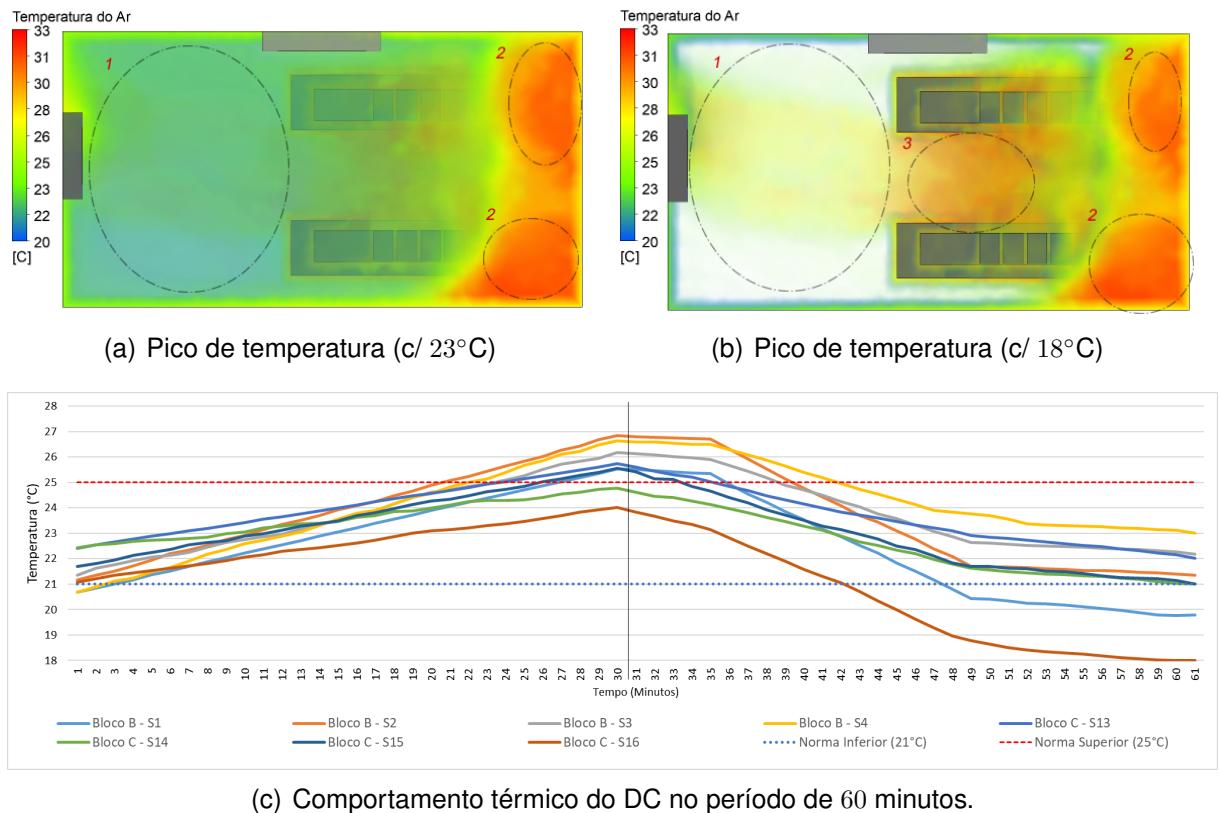


Figura 27 – Cenário 5: blocos de processamento *A* e *B* ativos.

ao formato de refrigeração ser intermitente, ligando e desligando o compressor.

5.4.12 Cenário 6 - Split 2

O cenário 6, apresentado na Figura 28, é o único cenário com o uso do Split-2 que não apresenta zonas térmicas vermelhas, analisando as cores, a maior temperatura observada está em torno de 26°C. Neste caso, os blocos *B* e *D* estão ativos e ficam localizados próximo ao climatizador.

Com o sistema a 23°C, além desta zona alaranjada, identifica-se as demais zonas em azul e verde, refletindo o melhor cenário dos testes com o Split-2. Ao mudar para 18°C, as zonas alaranjadas diminuem e as demais regiões apresentam zonas térmicas verdes ou azuis, com as temperaturas mais baixas de toda a bateria de testes, com Split-1 e Split-2.

A Figura 28(c) apresenta o comportamento semelhante aos demais, com estabilização da temperatura na migração para 18°C e com a temperatura sendo mantida a partir do minuto 48. A análise visual de zonas térmicas, apresentadas nesta seção por intermédio do Protótipo do MonTerDC, é uma importante ferramenta de auxílio a tomada de decisão do administrador do DC. A observação de dados crus, tais como

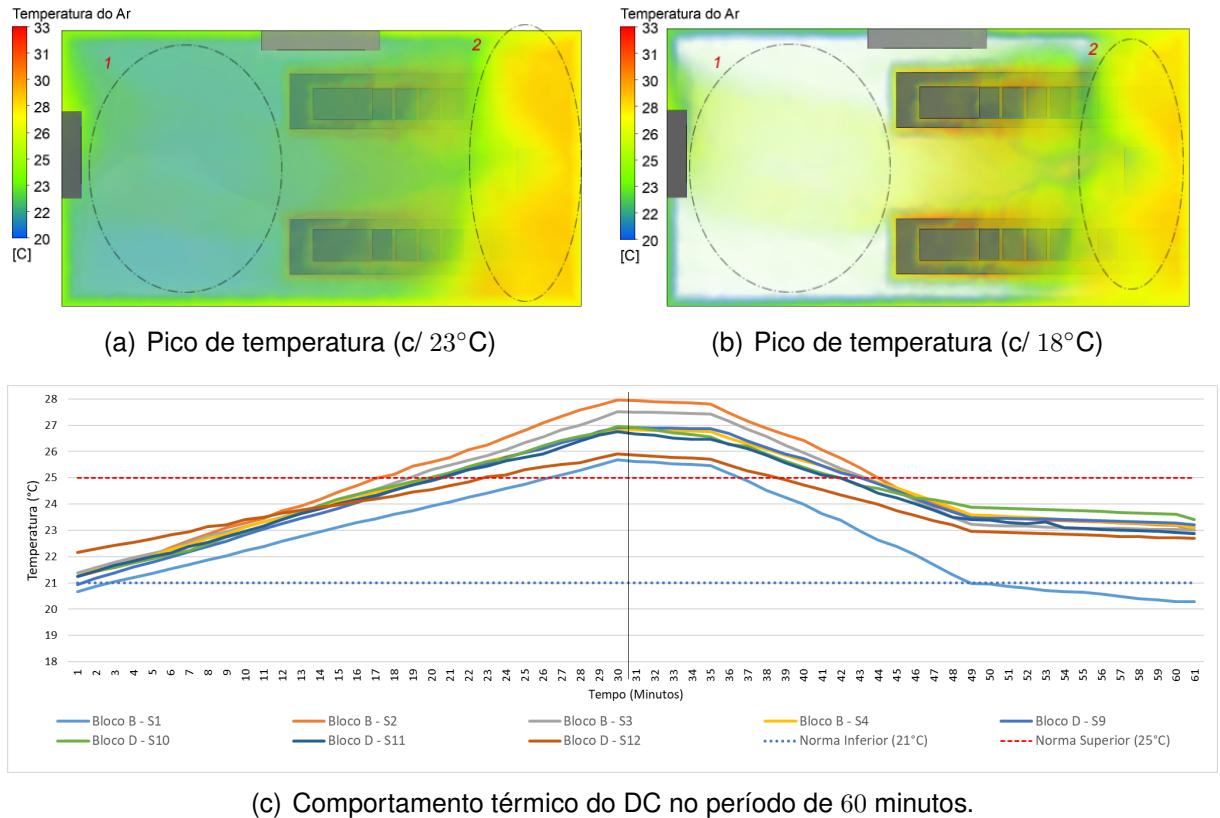


Figura 28 – Cenário 6: blocos de processamento A e B ativos.

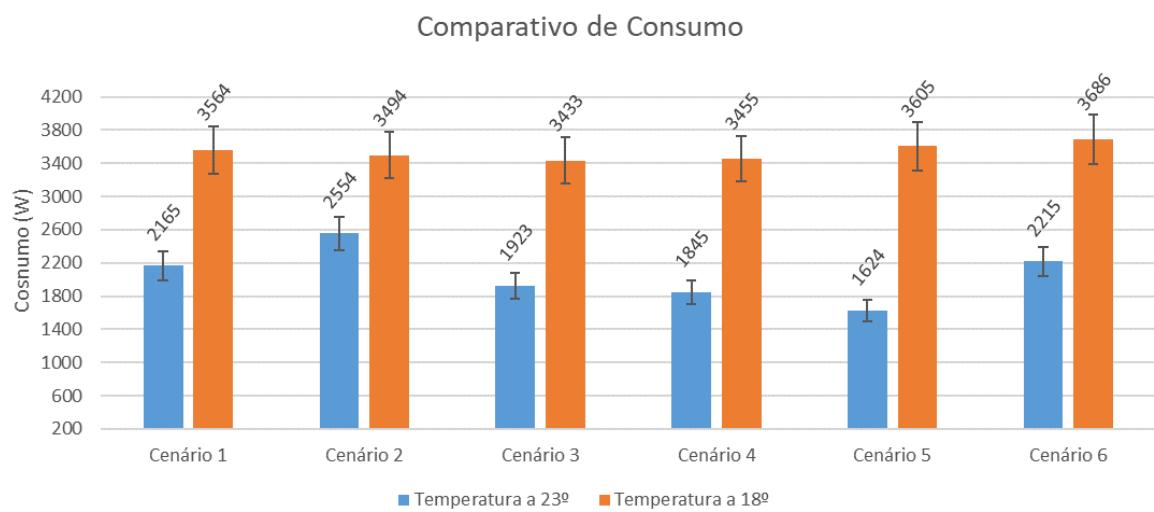
temperaturas obtidas diretamente através de sensores, pode direcionar as ações de administradores de DC a soluções pontuais (*i.e.*, baixar a temperatura climatização), em casos, cujo o problema pode estar relacionado com outros componentes da zona térmica (*i.e.*, geradores de calor mal distribuídos fisicamente). Fazer com que o ambiente de DC tenha zonas térmicas homogêneas e dentro da norma tem impacto no consumo de energia, visto que a climatização é um dos principais fatores de consumo em um DC.

5.5 IMPACTO ENERGÉTICO DE ACORDO COM AS ZONAS TÉRMICAS

Com a caracterização de zonas térmicas, auxiliado pelo Protótipo do MonTerDC, é possível aprofundar a análise do impacto energético relacionado com a formação de zonas de concentração de calor no ambiente de DC do LabP2D. Tendo em vista que a carga de trabalho nos blocos de processamento é a mesma em todos os cenários, pode-se inferir que a variação do consumo energético entre os cenários, caso haja, é consequência do posicionamento físico de cada bloco. A localização física dos blocos de processamento em cada cenário altera as correntes de ar, pois as fontes geradoras de calor estão em locais distintos, influenciando no controle do acionamento da clima-

tização. Neste contexto, o primeiro resultado desta seção é análise do comportamento energético total do DC com duas regulagens fixas na climatização (23°C e a 18°C). Sabendo-se que a climatização tem um forte impacto no consumo de energia do DC, o resultado esperado é que a redução da temperatura de 23°C para 18°C gere um aumento no consumo. Na Figura 29 tem-se os resultados da média e desvios padrão dos consumos mensurados ao longo do período de 60 minutos para os Cenários 1 à 6.

Figura 29 – Comparativo de Consumo por Cenário Split-1



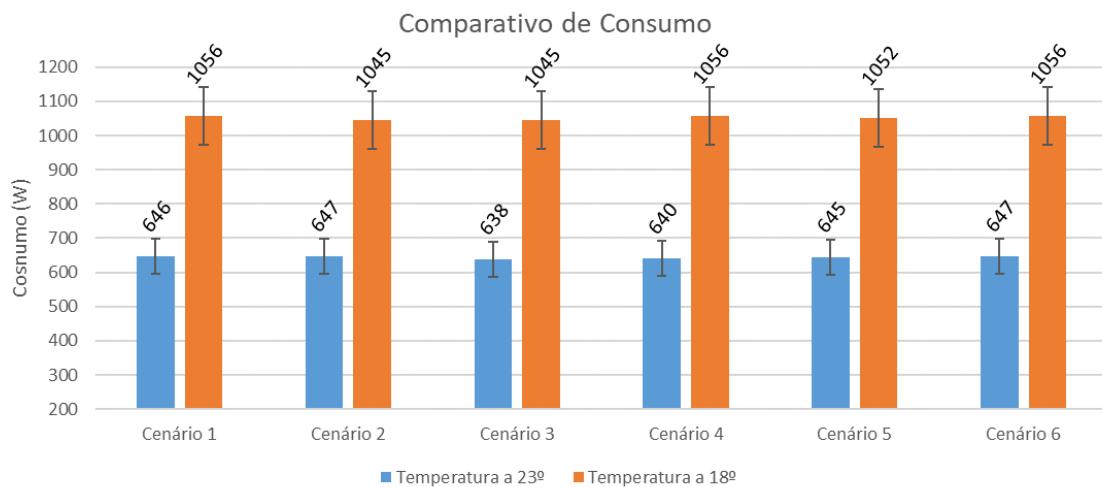
Fonte: O Autor

Como esperado, o consumo médio aumentou em todos os cenários, tendo como maior valor médio 3.686 Watts, no Cenário 6. Embora o Cenário 6 tenha tido o maior valor, os delimitadores (desvio padrão) tornam a comparação entre os cenários inconclusiva, não permitindo identificar, para o ambiente com regulagem a 18°C , o principal responsável pelo consumo de energia. Todavia, com uma análise mais refinada das fontes geradoras de calor, observou-se que o Cenários 1, 5 e 6 possuem médias ligeiramente superiores aos demais. O ponto em comum nestes cenários é o processamento ativo do Bloco *B*. Com uma visita *in loco*, constatou-se que o termostato, equipamento responsável pelo controle de ativação do compressor da climatização, encontra-se a alguns centímetros da fonte geradora de calor do Bloco *B*. Com esta constatação, pode-se inferir que consumo superior de energia nestes cenários pode ter sofrido influência deste fator. A definição da localização dos termostatos não faz parte da arquitetura MonTerDC, mas pode influenciar a formação de zonas térmicas em alguns casos.

O consumo energético com a climatização regulada a 23°C apresentou valores distintos. No Cenário 5, menor consumo energético, o valor foi de 1624 Watts, enquanto que no Cenário 2, maior consumo energético, foi de 2554 Watts. A diferença impressiona, pois para a mesma carga de processamento, a localização física dos blocos de processamento, do Cenário 5 para o Cenário 2, representou um aumento de consumo energético de 57%. Para entender o que impulsionou este aumento de consumo, a primeira análise feita foi a comparação entre as temperaturas descritas pelas Figuras 17(c) e 21(c).

O comportamento dos sensores ao longo do período é semelhante, porém a temperatura de alguns sensores do Cenário 2 varia em forma de onda. A variação em onda é típica da ativação e desativação do compressor da climatização, mas o gráfico não permite estabelecer relações diretas entre estes dois fatores. A segunda análise, foi a visual das zonas térmicas apresentadas nas Figuras 18(a) e 21(a). Observando estas zonas é possível identificar que a zona térmica à esquerda do Cenário 2 (Figura 18(a)) está mais aquecida (em tons de amarelo) do que a mesma zona do Cenário 5 (Figura 21(a)) (em tons de verde). Considerando que o termostato da climatização encontra-se neste zona e, que a climatização é o maior consumidor de energia, é possível concluir que a diferença de consumo é consequência da ativação mais frequente do compressor no Cenário 2 do que no 5.

Figura 30 – Comparativo de Consumo por Cenário Split-2



Fonte: O Autor

Nos testes com o uso do Split-2, como já mencionado, modelo *inverter*, que não desliga o compressor, o consumo de energia nos 6 cenários a 18°C foi pratica-

mente o mesmo (640W). O mesmo acontece com a temperatura a 23°C, aproximadamente 1050 watts. A diferença de consumo entre a refrigeração em 18°C e 23°C foi de aproximadamente 400 watts.

Com os resultados obtidos Split-1 com o protótipo do MonTerDC, pode-se identificar as zonas térmicas formadas no DC do LabP2D nos 6 cenários e, comprovar que a localização física das zonas interfere no consumo energético do DC. Entretanto, com o Split-2, o consumo apresentado em todos os cenários foi o mesmo. Porém, ao relacionar o consumo com a existência de zonas térmicas, identifica-se que mesmo com o ar condicionado *inverter*, pode-se economizar energia adequando a temperatura do sistema de climatização para que não existam zonas térmicas indesejáveis.

5.6 CONSIDERAÇÕES PARCIAIS

Os estudos relacionados ao trabalho identificaram diversas variações de abordagem quanto a climatização e economia de energia em ambientes de DC. Entretanto, para ambientes de DC *não-CRAC*, os sistemas para monitoramento da variação térmica, correntes de ar e zonas térmicas não são facilmente identificadas através de soluções comerciais ou simuladores.

Os testes realizados permitiram uma análise da relação do consumo de energia com climatização e as zonas térmicas criadas dinamicamente dentro do ambiente de DC. Identificou-se como as cargas de processamento dos servidores afetam as correntes de ar e zonas térmicas, permitindo assim, a visualização 3D do deslocamento térmico no DC.

Em estudo de caso real, a arquitetura MonTerDC proporcionou análise fina e *on-line* das zonas térmicas, constatando que o consumo energético para uma mesma carga de processamento pode ser 57% superior devido a localização física do servidores. O segundo projeto implantado no ambiente de DC do LabP2D ainda requer adequações, pois a alteração da evaporadora não garantiu a ausência de formação de zonas térmicas indesejáveis. O deslocamento do *rack* para o outro extremo da sala, próximo a evaporadora deve melhor a distribuição das zonas térmicas.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A concentração dos equipamentos de Tecnologia da Informação (TI) em ambientes de *Data Centers* (DCs) se tornou realidade devido a necessidade de aumento de poder computacional. Estes ambientes seguem normas e buscam classificações que, por sua vez, estão associadas a variação de temperatura e a projetos de sistemas de refrigeração. A relação entre a temperatura e os sistemas de refrigeração são fatores essenciais na avaliação energética de ambientes de DCs, sobretudo, sob a ótica da eficiência e TI Verde (SASAKURA; AOKI; WATANABE, 2017).

Neste ecossistema surgiram as nuvens computacionais, flexíveis e escaláveis, mas principalmente, fornecedoras de recursos virtualizados, estes recursos, vistos pelos usuários, como infinitos. Esta ilusão de recursos infinitos torna as nuvens computacionais dependentes de grande poder computacional, encontrados, na maioria das vezes, em ambientes de DCs. O controle destes recursos é essencial a tomada de decisão de administradores de nuvens computacionais, pois o modelo de serviço aplicado neste modelo de locação de recursos é o provisionamento sob demanda. Para controlar, é necessário monitorar (RIMAL; CHOI; LUMB, 2009; SHARMA et al., 2017).

O monitoramento é prática comum em ambientes de DCs de grande porte e, normalmente, parte integrada de soluções de gerenciamento de DCs. Ambientes mais modestos, DCs de pequeno e médio porte, têm maior dificuldade em adquirir soluções de gerenciamento integradas e de implantar projetos de refrigeração complexos, tais como *Computer Room Air Conditioner* (CRAC) (CAPOZZOLI; PRIMICERI, 2015; EBRAHIMI; JONES; FLEISCHER, 2014). Quanto aos sistemas de refrigeração, em sua maioria, estes DCs apoiam-se em projetos *não-CRAC* e soluções de gerenciamento com licenças abertas.

Neste contexto, soluções apoiadas em softwares de simulação *Computational Fluid Dynamicss* (CFDs) é uma prática comum (VODEL; RITTER, 2017). Flexíveis, porém sem vínculo direto *on-line* com o ambiente real. Por outro lado, estes ambientes também contam com soluções apoiadas em tecnologias *Internet of Things* (IoT), efetuando o sensoriamento físico do ambiente real (LEE; LEE, 2015). Neste caso, a restrição passa a ser a quantidade de componentes necessário para a cobertura completa do ambiente a ser monitorado. Portanto, o conflito entre as soluções está, principalmente, no grão de observação, ora superfíno e estático, ora grosso e dinâmico.

Apresentadas as necessidades de ambientes de DCs, bases para nuvens computacionais, vinculadas ao monitoramento térmico com grão de observação fino e

dinâmico, surgiu a principal contribuição deste trabalho, a Arquitetura de Monitoramento Término de Data Centers (MonTerDC). A arquitetura proposta é modular, não-intrusiva, flexível e atua em ambientes de DC de pequeno e médio porte com refrigeração *não-CRAC*, pouco explorados na literatura.

O Protótipo MonTerDC está operacional e foi implantado, primeiramente, em uma maquete na escala 1:11 do ambiente de DC do *Laboratório de Processamento Paralelo e Distribuído* (LabP2D) e, posteriormente, no próprio DC de produção do LabP2D, onde encontra-se hospedada a *Nuvem OpenStack Tche*. Os resultados com a maquete objetivavam, simplesmente, a aferição dos sensores e a configuração do protótipo, isso, sem a necessidade de interromper os processos dos usuários da *Nuvem OpenStack Tche*.

Os primeiros resultados obtidos, com protótipo MonTerDC no ambiente de DC real, foram sobre o projeto de sistema de refrigeração implantado no LabP2D em 2013. Logo, percebeu-se a concentração de zonas quentes a direita da sala, além de manter os equipamentos em temperaturas acima das definidas na norma, a má distribuição das correntes de ar frio impactavam no consumo de energia adicional. Partiu-se, então, para a elaboração de uma adequação física no ambiente de DC do LabP2D, projeto de sistema de refrigeração 2018. A substituição do equipamento de refrigeração, mas sobretudo, o melhor posicionamento da evaporadora interna, fizeram com que as correntes de ar fossem alteradas completamente e o consumo de energia total reduziu significativamente. A análise dos testes com o novo equipamento permite concluir que, embora a evaporadora esteja melhor posicionada, o posicionamento e distância entre os servidores ainda não está adequado. As informações disponibilizadas, pelo protótipo MonTerDC aos administradores, foram essenciais para a melhoria no ambiente de DC do LabP2D.

6.1 ARTIGOS E PARTICIPAÇÃO EM EVENTOS

No decorrer do presente trabalho, resultado das pesquisas nas áreas estudadas, foram publicados sete artigos científicos e oportunizado a participação do Protótipo MonTerDC em uma feira de Inovação Tecnológica. Os trabalhos estão listados a seguir, em ordem cronológica. São eles:

6.1.1 Publicações e/ou Eventos 2016

- 1º *Simpósio de Economia Colaborativa e Cidades Inteligentes e Humanas 2016*
- Modelo Computacional para análise de ambiente de Data Center. Joinville, SC.

2. ERAD 2016 - **Sistema de mapeamento das correntes de ar em um Data Center.** In: *Escola Regional de Alto Desempenho do Estado do Rio Grande do Sul*, 2016, São Leopoldo. XVI Escola Regional de Alto Desempenho do Estado do Rio Grande do Sul, 2016. p. 203-204.

6.1.2 Publicações e/ou Eventos 2017

3. ERAD 2017 - **SGTD: Sistema de Gerenciamento Térmico de Data Center.** In: *XVII Escola Regional de Alto Desempenho do Estado do Rio Grande do Sul*, 2017, Ijuí. XVII Escola Regional de Alto Desempenho do Estado do Rio Grande do Sul.
4. ERAD 2017 Iniciação Científica - **Simulação vs. Maquete: Mapeamento de Zonas Térmicas em Data Center.** In: *XVII Escola Regional de Alto Desempenho do Estado do Rio Grande do Sul*, 2017, Ijuí. XVII Escola Regional de Alto Desempenho do Estado do Rio Grande do Sul.
5. WSCAD 2017 - **Análise de zonas térmicas em Data Center não-CRAC.** In: *XVIII Simpósio em Sistemas Computacionais de Alto Desempenho*, 2017, Campinas. XVIII Simpósio em Sistemas Computacionais de Alto Desempenho.
6. SBESC 2017 (WND IoT) - **Mapeamento Térmico em DC de Pequeno e de Médio Porte.** In: *Brazilian Symposium on Computing Systems Engineering (SBESC) - Embedded Systems Competition 2017 - WND IoT Challenge*, 2017, Curitiba.

6.1.3 Publicações e/ou Eventos 2018

7. ERAD 2018 - **Análise da Influência do Fluxo das Correntes de Ar em Data Center de Pequeno e Médio Porte.** In: *XVIII Escola Regional de Alto Desempenho do Estado do Rio Grande do Sul - ERAD/RS 2018*, 2018, Porto Alegre. XVIII Escola Regional de Alto Desempenho do Estado do Rio Grande do Sul - ERAD/RS 2018. Porto Alegre: ERAD / RS, 2018. v. 1. p. 215-216.
8. SUBMISSÃO - WSCAD 2018 - **MonTerDC: No-CRAC Data Center Thermal Monitoring.** In: *XIX Simpósio em Sistemas Computacionais de Alto Desempenho*, 2018

6.2 TRABALHOS FUTUROS

A Solução IoT MonTerDC é de código aberto, flexível e modular, características que possibilitam a realização de novos projetos apoiados nesta arquitetura e/ou

protótipo. Algumas propostas de extensão da Solução IoT MonTerDC, para curto e médio prazos, são:

- **Serviço de Escalonamento Térmico:** Desenvolver uma aplicação para gerenciadores de nuvem para escalar e migrar máquinas virtuais apoiada no monitoramento térmico dinâmico do ambiente DC. O monitoramento térmico pode ser efetuado através do Protótipo MonTerDC e o foco pode ser consumo energético e/ou respeito as normas e boas práticas.
- **Estudo de Implantação em Ambientes com Sistemas de Refrigeração CRAC:** Embora a Solução IoT MonTerDC tenha sido projetada para ambiente com sistemas de refrigeração *não-CRAC*, a implantação do Protótipo MonTerDC em ambientes de DC com refrigeração CRAC pode ser explorado.

REFERÊNCIAS

- AHUJA, N. et al. Data center efficiency with higher ambient temperatures and optimized cooling control. In: **2011 27th Annual IEEE Semiconductor Thermal Measurement and Management Symposium**. [S.I.: s.n.], 2011.
- ALKHARABSHEH, S. et al. Implementing rack thermal capacity in a room level CFD model of a data center. In: **2014 Semiconductor Thermal Measurement and Management Symposium (SEMI-THERM)**. [S.I.: s.n.], 2014.
- ANSYS. Fluids - computational fluid dynamics. In: <http://www.ansys.com/products/fluids>. [s.n.], 2018. Disponível em: <<http://www.ansys.com/products/fluids>>.
- ARGHODE, V. K.; JOSHI, Y. Modeling Strategies for Air Flow Through Perforated Tiles in a Data Center. **IEEE Transactions on Components**, v. 3, n. 5, may 2013. ISSN 2156-3950.
- ASHRAE. **ASHRAE TC9.9, Data Center Networking Equipment**. [S.I.]: Whitepaper prepared by ASHRAE Technical Committee (TC) 9.9, 2016.
- ATHAVALE, J. et al. Impact of active tiles on data center flow and temperature distribution. In: **2016 15th IEEE Intersociety Conference on Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems (ITherm)**. [S.I.: s.n.], 2016. p. 1162–1171.
- AUTODESK. Autodesk cfd motion. In: <https://www.autodesk.com/education/free-software/cfd-motion>. [s.n.], 2018. Disponível em: <<https://www.autodesk.com/education/free-software/cfd-motion>>.
- AVELAR, V.; AZEVEDO, D.; FRENCH, A. **PUETM: A Comprehensive examination of the metric**. The Green Grid, 2012. Disponível em: <https://datacenters.lbl.gov/sites/all/files/WP49-PUE%20A%20Comprehensive%20Examination%20of%20the%20Metric_v6.pdf>.
- BACCOUR, E. et al. Ptnet: An efficient and green data center network. **Journal of Parallel and Distributed Computing**, v. 107, p. 3 – 18, 2017. ISSN 0743-7315. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0743731517300953>>.
- BEGUM, S.; KHAN, M. K. Potential of cloud computing architecture. In: **IEEE. Information and Communication Technologies (ICICT), 2011 International Conference on**. [S.I.], 2011. p. 1–5.
- BICSI-002. Ansi/bicsi-002-2014. In: **UPTIME INSTITUTE**. [S.I.: s.n.], 2014.
- BLUETOOTH. Bluetooth sig member. In: <https://www.bluetooth.com/develop-with-bluetooth/join>. [s.n.], 2018. Disponível em: <<https://www.bluetooth.com/develop-with-bluetooth/join>>.
- BOTTARI, G. D. **Monitoramento Térmico Responsivo para Centros de Processamento de Dados**. Tese (Master Degree) — Universidade Federal Fluminense, Niteroi, 2014.

- BROWN, E. G. 2013 building energy efficiency standards. In: **Title 24, Part 6, and Associated Administrative Regulations in Part 1**. CALIFORNIA ENERGY: [s.n.], 2012.
- CAMILLO, A. J. et al. Análise de zonas térmicas em data center não-crac. In: **WSCAD 2017**. Campinas, SP: [s.n.], 2017.
- CAPOZZOLI, A.; PRIMICERI, G. Cooling systems in data centers: State of art and emerging technologies. **Energy Procedia**, v. 83, p. 484 – 493, 2015. ISSN 1876-6102. Sustainability in Energy and Buildings: Proceedings of the 7th International Conference SEB-15. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610215028337>>.
- CHEN, K. et al. Osa: an optical switching architecture for data center networks with unprecedented flexibility. In: **IEEE/ACM Transactions on Networking (TON)**. IEEE Press, v. 22, n. 2, p. 498–511, 2014.: [s.n.], 2014.
- CLOUDSTACK, A. Cloudstack. In: <https://cloudstack.apache.org/>. [s.n.], 2018. Disponível em: <<https://cloudstack.apache.org/>>.
- COMSOL. Comsol multiphysics simulation platform. In: <https://br.comsol.com/cfd-module>. [s.n.], 2018. Disponível em: <<https://br.comsol.com/cfd-module>>.
- DAY, T. **Data center cooling**. Google Patents, 2002. US9392733B2. Disponível em: <<https://patents.google.com/patent/US9392733B2/en>>.
- DOBS, J. R. D.; HENCEY, B. M. A comparison of thermal zone aggregation methods. In: **51st IEEE**. December 10-13, 2012. Maui, Hawaii, USA: [s.n.], 2012.
- EBRAHIMI, K.; JONES, G. F.; FLEISCHER, A. S. A review of data center cooling technology, operating conditions and the corresponding low-grade waste heat recovery opportunities. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 31, p. 622 – 638, 2014. ISSN 1364-0321. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032113008216>>.
- EUCALYPTUS. Eucalyptus. In: <https://github.com/eucalyptus/eucalyptus>. [s.n.], 2018. Disponível em: <<https://github.com/eucalyptus/eucalyptus>>.
- FACEBOOK. Lulea datacenter. In: <https://www.facebook.com/LuleaDataCenter>. [s.n.], 2017. Disponível em: <<https://www.facebook.com/LuleaDataCenter>>.
- FAHRIANTO, F. et al. Smart data centre monitoring system based on internet of things (iot) (study case: Pustipanda uin jakarta). In: **2017 5th International Conference on Cyber and IT Service Management (CITSM)**. [S.I.: s.n.], 2017. p. 1–9.
- FLOW3D. Flow-3d. In: <https://www.simulacionesyproyectos.com/software/flow3d/>. [s.n.], 2018. Disponível em: <<https://www.simulacionesyproyectos.com/software/flow3d/>>.
- FULPAGARE, Y.; SHIRBHATE, P.; BHARGAV, A. Design and testing of prototype data center. In: **15th IEEE ITherm Conference**. Indian Institute of Technology: [s.n.], 2016.
- GAO, T. et al. Innovative server rack design with bottom located cooling unit. In: **2016 15th IEEE ITherm**. [S.I.: s.n.], 2016.

- GARG, S.; BUYYA, R. Green cloud computing and environmental sustainability. p. 315–340, 01 2012.
- GOOGLE. Google datacenters - from paper mill to data center. In: <https://www.google.com/about/datacenters/inside/locations/hamina/>. [s.n.], 2012. Disponível em: <<https://www.google.com/about/datacenters/inside/locations/hamina/>>.
- HORNER, N.; AZEVEDO, I. Power usage effectiveness in data centers: Overloaded and underachieving. In: **The Electricity Journal - 29**. [S.l.: s.n.], 2016. p. 61–69.
- HUGHES, J. M. Arduino: A technical reference. In: **Arduino: A Technical Reference**. California:O'Reilly Media: [s.n.], 2016.
- JAIN, A. et al. Energy efficient computing- green cloud computing. In: **2013 International Conference on Energy Efficient Technologies for Sustainability**. [S.l.: s.n.], 2013. p. 978–982.
- KAKAKHEL, S. R. U. et al. Virtualization at the network edge: A technology perspective. In: **2018 Third International Conference on Fog and Mobile Edge Computing (FMEC)**. Barcelona, Spain: [s.n.], 2018.
- KAVIS, M. J. Architecting the cloud: Design decisions for cloud computing service models. In: **Architecting the Cloud: Design Decisions for Cloud Computing Service Models. Saas, PaaS, IaaS**. Hoboken, New Jersey: [s.n.], 2014.
- KEIVANI, A.; GHAYOOR, F.; TAPAMO, J. A review of recent methods of task scheduling in cloud computing. In: **2018 19th IEEE Mediterranean Electrotechnical Conference (MELECON)**. Marrakech, Morocco, Morocco: [s.n.], 2018.
- KHAJEH-HOSSEINI, A.; SOMMERVILLE, I.; SRIRAM, I. Research challenges for enterprise cloud computing. **CoRR**, abs/1001.3257, 2010.
- KHAN, M. et al. Container-based virtualization for heterogeneous hpc clouds: Insights from the eu h2020 cloudlightning project. In: **2018 IEEE International Conference on Cloud Engineering (IC2E)**. Orlando, FL, USA: [s.n.], 2018.
- LANDI, G. et al. Joint intra- and inter-datacenter network optimization and orchestration. In: **2018 Optical Fiber Communications Conference and Exposition (OFC)**. 11-15 March 2018, San Diego, CA, USA: [s.n.], 2018.
- LEE, I.; LEE, K. The internet of things (iot): Applications, investments, and challenges for enterprises. **Business Horizons**, v. 58, n. 4, p. 431 – 440, 2015. ISSN 0007-6813. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0007681315000373>>.
- LEI, L.; LIANG, C.; LIU, J. A cyber-physical forecasting model for data centers. In: **17th ACM SIGKDD**. San Diego, California, USA: [s.n.], 2011.
- LEIRIA, R.; DRUMM, M.; FERRETO, T. Monitoramento energetico utilizando o openstack ceilometer. In: **Escola Regional de Alto Desempenho do Rio Grande do Sul**. Ijuí, SC: [s.n.], 2017.

LEVY, M.; HALLSTROM, J. O. A Reliable , Non-Invasive Approach to Data Center Monitoring and Management. **Advances in Science, Technology and Engineering Systems Journal**, v. 2, n. 3, p. 1577–1584, 2017. Disponível em: <<https://astesj.com/v02/i03/p196/>>.

LEVY, M.; HALLSTROM, J. O. A new approach to data center infrastructure monitoring and management (DCIMM). In: **2017 IEEE 7th Annual Computing and Communication Workshop and Conference (CCWC)**. [S.I.: s.n.], 2017. p. 1–6.

LI, Y. et al. Transforming cooling optimization for green data center via deep reinforcement learning. **CoRR**, abs/1709.05077, 2017.

LIU, Q. et al. Green data center with iot sensing and cloud-assisted smart temperature control system. **Computer Networks**, v. 101, p. 104 – 112, 2016. ISSN 1389-1286. Industrial Technologies and Applications for the Internet of Things. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1389128615004739>>.

LORAWAN. Lorawan. In: **<https://lora-alliance.org/about-lorawan>**. [s.n.], 2018. Disponível em: <<https://lora-alliance.org/about-lorawan>>.

LOW, C.; CHEN, Y.; WU, M. Understanding the determinants of cloud computing adoption. **Industrial Management & Data Systems**, v. 111, n. 7, p. 1006–1023, 2011. Disponível em: <<https://doi.org/10.1108/02635571111161262>>.

MADAKAM, S.; RAMASWAMY, R.; TRIPATHI, S. Internet of things (iot): A literature review. In: **Journal of Computer and Communications, 2015, 3, 164-173**. [S.I.: s.n.], 2015.

MALIK, S. U. R. et al. Modeling and analysis of the thermal properties exhibited by cyberphysical data centers. **IEEE Systems Journal**, v. 11, n. 1, p. 163–172, March 2017. ISSN 1932-8184.

MANVI, S. S.; SHYAM, G. K. Resource management for infrastructure as a service (iaas) in cloud computing: A survey. **Journal of Network and Computer Applications**, v. 41, p. 424 – 440, 2014. ISSN 1084-8045. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1084804513002099>>.

MARSHALL, L.; BEMIS, P. Using CFD for data center design and analysis. **Applied Math Modeling White Paper**, 2011.

MARSTON, S. et al. Cloud computing – the business perspective. decision support systems. In: . [S.I.]: Elsevier, v.51, p. 176-189, 2011.

MELL, P.; GRANCE, T. The nist definition of cloud computing. In: . NIST - National Institute of Standards and Technology., 2011. Disponível em: <<http://csrc.nist.gov/publications/nistpubs/800-145/SP800-145.pdf>>.

NFC. Nfc certified products. In: **<https://nfc-forum.org/our-work/compliance/certification-program/certification-register/>**. [s.n.], 2018. Disponível em: <<https://nfc-forum.org/our-work/compliance/certification-program/certification-register/>>.

OLIVEIRA, S. Internet das coisas com esp8266, arduino e raspberry pi. In: **Internet das Coisas com ESP8266, Arduino e Raspberry PI**. São Paulo: Novatec Editora Ltda: [s.n.], 2017.

OPENNEBULA. Open nebula. In: <https://opennebula.org/>. [s.n.], 2018. Disponível em: <<https://opennebula.org/>>.

OPENSTACK. Openstack. In: <https://www.openstack.org/software/>. [s.n.], 2018. Disponível em: <<http://www.openstack.org>>.

PAKBAZNIA, E.; GHASEMAZAR, M.; PEDRAM, M. Temperature-aware dynamic resource provisioning in a power-optimized datacenter. In: **Automation Test**. [S.l.: s.n.], 2010.

PANDIKUMAR, S.; KABILAN, S. P.; AMALRAJ, L. Article: Green it: A study and analysis of environmental impact of social networks and search engines. **International Journal of Computer Applications**, v. 60, n. 6, p. –, December 2012. Full text available.

RAHIMI, M. R. et al. Mobile cloud computing: A survey, state of art and future directions. **Mobile Networks and Applications**, v. 19, n. 2, p. 133–143, 2014. ISSN 1572-8153. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1007/s11036-013-0477-4>>.

RFID. Rfid - member directory. In: <https://rainrfid.org/member-directory/>. [s.n.], 2018. Disponível em: <<https://rainrfid.org/member-directory/>>.

RICHARDSON, S.; WALLACE, M. Getting started with raspberry pi. In: **Getting Started With Raspberry Pi**. O'Reilly, Sebastopol: [s.n.], 2013.

RIMAL, B. P.; CHOI, E.; LUMB, I. A taxonomy and survey of cloud computing systems. In: **2009 Fifth International Joint Conference on INC, IMS and IDC**. [S.l.: s.n.], 2009. p. 44–51.

SASAKURA, K.; AOKI, T.; WATANABE, T. Study on data center optimal management by utilizing data center infrastructure management. In: **2017 IEEE International Telecommunications Energy Conference (INTELEC)**. [S.l.: s.n.], 2017. p. 604–608.

SCHNEIDER, E. Soluções em climatização para data center. In: . Brasília/Brasil: XIV Encontro Nacional de Empresas Projetistas e Consultores da Abrava, 2014.

SHARMA, P. et al. Design and operational analysis of a green data center. **IEEE Internet Computing**, p. 1–1, 2017. ISSN 1089-7801.

SIGFOX. Sigfox. In: <https://www.sigfox.com/en/coverage>. [s.n.], 2018. Disponível em: <<https://www.sigfox.com/en/coverage>>.

SIMFLOW. simflow cfd software. In: <https://sim-flow.com/download/free-cfd-software/>. [s.n.], 2018. Disponível em: <<https://sim-flow.com/download/free-cfd-software/>>.

SONG, C. et al. Using power trend predictor to improve datacenter thermal management efficiency. In: **2017 33rd Thermal Measurement, Modeling Management Symposium (SEMI-THERM)**. [S.l.: s.n.], 2017. p. 150–154. ISSN 1065-2221.

- SONG, Z.; ZHANG, X.; ERIKSSON, C. Data Center Energy and Cost Saving Evaluation. **Energy Procedia**, v. 75, p. 1255–1260, aug 2015. ISSN 1876-6102. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610215009467>>.
- SVERDLIK, Y. Survey: Industry average data center pue stays nearly flat over four years. In: . Uptime Institute, 2014. Disponível em: <<http://www.datacenterknowledge.com/archives/2014/06/02/survey-industry-average-data-center-pue-stays-nearly-flat-four-years/>>.
- TANG, Q.; GUPTA, S. K. S.; VARSAMOPOULOS, G. Energy-Efficient Thermal-Aware Task Scheduling for Homogeneous High-Performance Computing Data Centers. **IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems**, v. 19, n. 11, nov 2008. ISSN 1045-9219.
- THREAD. Thread group. In: <https://www.threadgroup.org/>. [s.n.], 2018. Disponível em: <<https://www.threadgroup.org/>>.
- TIA-942. Ansi/eia/tia942. In: **UPTIME INSTITUTE**. [S.I.: s.n.], 2005.
- VELTE, A. T. et al. Cloud computing: Computação em nuvem uma abordagem prática. In: . Rio de Janeiro: Editora Alta Books: [s.n.], 2012.
- VODEL, M.; RITTER, M. Thermal fingerprinting - multi-dimensional analysis of computational loads. In: **2017 International Conference on Information Resources Management CONF-IRM 2017, Santiago de Chile, Chile, May 17-19, 2017**. [S.I.: s.n.], 2017. p. 35.
- WI-FI. Membership - member companies. In: <https://www.wi-fi.org/membership/member-companies>. [s.n.], 2018. Disponível em: <<https://www.wi-fi.org/membership/member-companies>>.
- WIBRON, E. **CFD Modeling of an Air-Cooled Data Center**. Tese (Master Degree) — CHALMERS University of Technology, Gothenburg/Sweden, 2015. Disponível em: <<http://publications.lib.chalmers.se/records/fulltext/219609/219609.pdf>>.
- WOUWER, A. V. et al. An approach to the selection of optimal sensor locations in distributed parameter systems. **Journal of Process Control**, v. 10, n. 4, p. 291 – 300, 2000. ISSN 0959-1524.
- YUAN, H. et al. Time-aware multi-application task scheduling with guaranteed delay constraints in green data center. **IEEE Transactions on Automation Science and Engineering**, p. 1–14, 2017. ISSN 1545-5955.
- Z-WAVE. Z-wave adoption. In: <http://www.z-wave.com/learn>. [s.n.], 2018. Disponível em: <<http://www.z-wave.com/learn>>.
- ZHANG, J. et al. Sustainable green data center: Guaranteeing flow deadlines in chains of virtual network functions with mrouting. **Sustainable Computing: Informatics and Systems**, 2018. ISSN 2210-5379. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2210537917304274>>.
- ZHANG, S. et al. On demand cooling with real time thermal information. In: **2015 31st Thermal Measurement, Modeling Management Symposium (SEMI-THERM)**. [S.I.: s.n.], 2015. p. 138–146.

ZIGBEE. Zigbee certified products. In: **http://www.zigbee.org/zigbee-products-2/**. [s.n.], 2018. Disponível em: <<http://www.zigbee.org/zigbee-products-2/>>.