

UNIVERSIDADE SANTA CECÍLIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA
MESTRADO EM ENGENHARIA MECÂNICA

ROBERTO EGON HEINRICH

**COORDENAÇÃO DE FLUXO DE AR CONDICIONADO EM *DATA CENTERS*:
ARRANJOS E SIMULAÇÕES COM *CFD (COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS)***

SANTOS/SP

2016

ROBERTO EGON HEINRICH

**COORDENAÇÃO DE FLUXO DE AR CONDICIONADO EM *DATA CENTERS*:
ARRANJOS E SIMULAÇÕES COM *CFD (COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS)***

Dissertação apresentada à Universidade Santa Cecília como parte dos requisitos para obtenção de título de mestre no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, sob orientação do Prof. Dr. Claudio Rodrigo Torres e coorientação do Prof. Dr. Aldo Ramos Santos.

SANTOS/SP

2016

Autorizo a reprodução parcial ou total deste trabalho, por qualquer que seja o processo, exclusivamente para fins acadêmicos e científicos.

Heinrich, Roberto Egon.
COORDENAÇÃO DE FLUXO DE AR CONDICIONADO EM DATA CENTERS:
ARRANJOS E SIMULAÇÕES COM CFD (COMPUTACIONAL FLUID
DYNAMICS) / Roberto Egon Heinrich.

-- 2016.
112 f.

Orientador: Cláudio Rodrigo Torres.
Coorientador: Aldo Ramos Santos.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Santa Cecília,
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Santos,
SP, 2016.

1. Centro de dados. 2. AVAC. 3. Refrigeração. 4. Corredores
enclausurados. 5. Eficiência energética. I. Torres, Cláudio
Rodrigo. orient. II. Santos, Aldo Ramos. coorient. III.
Coordenação de fluxo de ar condicionado em data centers:
arranjos e simulações com CFD (Computational Fluid Dynamics).

Elaborada pelo SIBi – Sistema Integrado de Bibliotecas - Unisanta

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a minha esposa Maria do Céu, com sua paciência de fato celeste, meus filhos Maria Helena, Sara e Wagner e suas respectivas famílias, pois são os motivos de minha persistência e evolução como ser humano e profissional.

AGRADECIMENTOS

Agradeço especialmente ao Professor Doutor Cláudio Rodrigo Torres e ao Professor Doutor Aldo Ramos Santos pela minha orientação na condução deste trabalho e em especial pela paciência quanto à conciliação de agenda, dificultada pelas minhas tarefas profissionais do dia a dia.

Agradeço também à Schneider Electric e sua equipe que gentilmente concordaram e cederam o software de modelagem e simulações CFD empregado nas proposições deste trabalho.

Agradeço mais uma vez à minha esposa e meus filhos que, com a graça de Deus, todos bem formados e excelentes profissionais em suas respectivas áreas, desde o Direito, à Pedagogia, à Fotografia e às Ciências da Computação, se dispuseram a revisar todos os textos, refinando a qualidade final da apresentação.

Agradeço adicionalmente a um grande número de colegas de trabalho e profissionais da área, que contribuíram com suas valiosas opiniões para a consolidação da estrutura do trabalho.

Agradeço finalmente a toda a equipe de apoio e Secretaria dos cursos de Mestrado, especialmente às Sras. Sandra e Imaculada que, com eficiência competência e simpatia, organizam as nossas atividades e processos no desenvolvimento do curso e do trabalho.

EPÍGRAFE

“Data centre energy demand has grown steadily as load densities have grown exponentially in line with Moore’s law. These densities are pushing the boundaries of current cooling infrastructure designs and forcing a rethink on fundamental data centre air-management issues. Air-management metrics contribute substantially to data centre energy efficiency. Understanding air management metrics and subsequent optimization is considered the corner stone to greening of data centres. ”

“A demanda de energia de centros de dados tem crescido linearmente enquanto as densidades de carga têm crescido exponencialmente em linha com a lei de Moore. Essas densidades estão empurrando os limites dos projetos de refrigeração atuais e forçando um repensar dos problemas fundamentais da gestão do ar no centro de dados. Métricas de gestão do ar contribuem substancialmente para a eficiência energética do centro de dados. Entender as métricas de gestão do ar e a subsequente otimização desta é considerado a pedra fundamental para a sustentabilidade dos centros de dados. ”

Munther Salim, Ph.D.

RESUMO

Centros de dados são definidos como ambientes de missão crítica que vem demandando progressivamente mais densidade de potência devido à consolidação de ambientes e o forte crescimento das operações virtualizadas e/ou em nuvem. O consumo de energia com sustentabilidade energética ou eficiência energética é uma preocupação central dos gestores de centros de dados modernos. Depois do consumo de energia dos ativos de TIC (Tecnologia da Informação e Comunicação), o consumo de energia dos sistemas de AVAC (Aquecimento Ventilação e Ar Condicionado) é o maior. Isto coloca os sistemas de AVAC de centros de dados em evidência para o aprimoramento de soluções eficientes de engenharia. Este trabalho apresenta uma visão técnica e pragmática de recomendações para os principais fatores que devem ser considerados pelos projetistas e proprietários destes sistemas, facilitando a melhor escolha técnica de otimização do desempenho energético do circuito fechado de ar refrigerado entre as fontes de carga térmica do ambiente (ativos de TIC) e os equipamentos de AVAC. O foco é o conjunto de equipamentos e acessórios utilizados para o transporte e orientação dos fluxos de ar refrigerado e aquecido, ao longo do referido circuito. Foram simuladas as principais alternativas de soluções regularmente disponíveis no mercado, associadas às condições-problema mais comuns, de modo consistente com as melhores práticas em uso na atualidade, apontando os resultados de cada solução com a correspondente simulação com DFC (Dinâmica de Fluidos Computacional), justificando a proposição. Essas informações viabilizam identificar o cenário corrente de uma instalação e obter orientação de apoio para a tomada de decisões de implementação.

Palavras-chave: Centro de Dados. AVAC. Refrigeração. Corredores Enclausurados. Eficiência Energética.

ABSTRACT

Data Centers are defined as mission critical environments that are progressively demanding more power density due to the consolidation of solutions and services and also the strong growth of virtualized operations and/or cloud services. The power consumption with energy sustainability or energy efficiency is the main concern of the modern Data Center managers. After the ITC (Information Technology and Communication) assets, the energy consumption of the HVAC (Heating, Ventilation and Air Conditioning) systems is the bigger one. This highlights the Data Center HVAC systems for the improvement of efficient engineering technical solutions. This work presents a technical and pragmatic view of recommendations for the main factors that must to be considered by the designers and owners of these systems, making easier the best technical choice for the optimization of cooled air closed circuit among the thermal load sources of the environment (ITC assets) and the HVAC devices. The focus is the set of equipment and accessories utilized for the transportation and orientation of the air flow along the referred circuit. The main solutions regularly found in the market were simulated in association with the common problem conditions, in a consistent way with the best practices nowadays in use, showing the results of each solution through the related CFD (Computational Fluid Dynamics) simulation, justifying the proposition. This information allows to identify the current scenery of a facility and get orientation for an implementation decision making.

Keywords: Data Center. HVAC. Cooling. Contained Aisles. Energy Efficiency.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - <i>Data center</i> típico.	23
Figura 2 - <i>Data center</i> - Sistema elétrico - De fonte até <i>PDU</i>	23
Figura 3 - <i>Data center</i> - Sistema elétrico típico - De <i>PDU</i> a <i>rack</i>	24
Figura 4 - <i>Data center</i> - Sistema VAC típico - Da rejeição ao <i>rack</i>	24
Figura 5 - <i>Data center</i> - Planta típica - Médio porte.	25
Figura 6 - Projeção do consumo elétrico por <i>data centers</i> na Alemanha.	28
Figura 7 - Evolução do espaço de piso de TI em <i>data centers</i> na Alemanha.	31
Figura 8 - Fluxograma de energia através dos sistemas de um <i>data center</i> típico. ..	35
Figura 9 - Cálculo do <i>PUE</i>	36
Figura 10 – Exemplo de evolução sazonal do <i>PUE</i> para um <i>data center</i>	38
Figura 11 - Condição prejudicada de operação de ativos de TIC.	40
Figura 12 - Custo de interrupção de <i>DCs</i> em R\$x1000, por mercado (2016).	45
Figura 13 - Fluxo de recirculação.	47
Figura 14 - Fluxo de <i>bypass</i>	48
Figura 15 - Fluxo de pressão negativa.	48
Figura 16 - Separação de fluxo entre <i>racks</i> - painel cego.	49
Figura 17 - Diagrama de circuitos de ar na sala de dados.	50
Figura 18 - Coordenação de fluxos de ar por separação.	50
Figura 19 - <i>Rack</i> típico com painel de fechamento.	51
Figura 20 - Fluxo de ar no <i>rack</i>	52
Figura 21 - Fluxo de ar na sala.	52
Figura 22 - Arranjo de corredores quentes enclausurados.	53
Figura 23 - Arranjo de corredores frios enclausurados.	53
Figura 24 - <i>Racks</i> enclausurados na descarga.	54
Figura 25 - Balanço típico de pressões na sala de dados.	55
Figura 26 - Temperatura máxima para TIC - Pesquisa ASHRAE (TC 9.9) 2008.	57
Figura 27 - Carta psicrométrica e janelas ou envelopes ASHRAE (TC 9.9) 2008.	58
Figura 28 - Modelo típico de <i>CFD</i> para <i>data center</i>	61
Figura 29 - <i>CFD</i> - Geometria do volume e malha ou grade.	62
Figura 30 - <i>CFD</i> - Ajustes da grade função da geometria.	62
Figura 31 - <i>CFD</i> - Resultado convergente do computador.	63
Figura 32 - <i>CFD</i> - Apresentação típica de resultados.	64

Figura 33 - Modelo de arquitetura - Arranjo corredores quentes e frios.	69
Figura 34 - Modelo com corredores quentes e frios – Planta.	69
Figura 35 - Modelo de arquitetura - Arranjo corredores frios enclausurados.	70
Figura 36 - Modelo com corredores frios enclausurados – Planta.	70
Figura 37 - Modelo de arquitetura - Arranjo corredores quentes enclausurados.	71
Figura 38 - Modelo com corredores quentes enclausurados – Planta.	71

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Categorização de data centers por tamanhos.....	26
Tabela 2 - Classificação de densidades de carga elétrica por <i>rack</i> de <i>data centers</i> . 26	
Tabela 3 - Demanda total de energia elétrica para TIC estimada para data centers.27	
Tabela 4 - Tipologia de <i>data centers</i> (visão geral).	30
Tabela 5 - Consumo elétrico de <i>data centers</i> , por mercado, nos EUA.....	32
Tabela 6 - Participações no consumo de energia de um <i>data center</i> típico.	35
Tabela 7 - AHSRAE (TC 9.9) Classe A1 – 2008.	56
Tabela 8 - Ambiente para ativos de TIC (equipamentos ligados).....	56
Tabela 9 - Resultados agrupados das simulações <i>CFD</i>	112

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Classificação da eficiência através do <i>PUE</i> de <i>data centers</i>	37
Quadro 2 - Focos de potencial redução da ineficiência energética no <i>data center</i> . ..	39
Quadro 3 - Práticas adequadas para economia de energia em <i>data centers</i>	41
Quadro 4 - Questão 19a do inquérito Ponemon 2013 - Paradas de <i>data centers</i>	42
Quadro 5 - Questão 19b do inquérito Ponemon 2013 - Paradas de <i>data centers</i>	43
Quadro 6 - Critérios e considerações – Coordenação de fluxo de ar - <i>Data center</i> . .	59
Quadro 7 - <i>CFD</i> Grupos de informação em cada simulação.....	72
Quadro 8 - <i>CFD</i> Resumo das simulações.....	73
Quadro 9 - Simulação A.....	74
Quadro 10 - Simulação A (continuação).	75
Quadro 11 - Simulação B.....	76
Quadro 12 - Simulação B (Continuação).....	77
Quadro 13 - Simulação C.....	78
Quadro 14 - Simulação C (Continuação).	79
Quadro 15 - Simulação D.....	80
Quadro 16 - Simulação D (Continuação).	81
Quadro 17 - Simulação E.....	82
Quadro 18 - Simulação E (Continuação).....	83
Quadro 19 - Simulação F.....	84
Quadro 20 - Simulação F (Continuação).....	85
Quadro 21 - Simulação G.....	86
Quadro 22 - Simulação G (Continuação).	87
Quadro 23 - Simulação H.....	88
Quadro 24 - Simulação H (Continuação).	89
Quadro 25 - Simulação I.....	90
Quadro 26 - Simulação I (Continuação).	91
Quadro 27 - Simulação J.....	92
Quadro 28 - Simulação J (Continuação).	93
Quadro 29 - Simulação K.....	94
Quadro 30 - Simulação K (Continuação).....	95
Quadro 31 - Simulação L.....	96
Quadro 32 - Simulação L (Continuação).....	97

Quadro 33 - Simulação M.....	98
Quadro 34 - Simulação M (Continuação).....	99
Quadro 35 - Simulação N.....	100
Quadro 36 - Simulação N (Continuação).	101

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AG	–	Água Gelada
AVAC	–	Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado
ASHRAE	–	<i>American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers</i>
ATS	–	<i>Automatic Transfer Switch</i>
CAG	–	Central de Água Gelada
CAPEX	–	<i>Capital Expenditure</i>
CD	–	Centro de Dados
CFD	–	<i>Computational Fluid Dynamics</i>
CIO	–	<i>Chief Information Officer</i>
CQE	–	Corredor Quente Enclausurado
CRAC	–	<i>Computer Room Air Conditioner</i>
CRAH	–	<i>Computer Room Air Handler</i>
DC	–	<i>Data Center</i>
DCiE	–	<i>Data Center Infrastructure Efficiency</i>
DCPI	–	<i>Data Center Physical Infrastructure</i>
DFC	–	Dinâmica de Fluidos Computacional
EUA	–	Estados Unidos da América
HVAC	–	<i>Heating Ventilation and Air Conditioning</i>
KPI	–	<i>Key Performance Indicator</i>
MTBF	–	<i>Mean Time Between Failure</i>
MTTR	–	<i>Mean Time to Repair</i>
OPEX	–	<i>Operational Expenditure</i>
PDU	–	<i>Power Distribution Unit</i>
PUE	–	<i>Power Usage Effectiveness</i>
RAG	–	Rede de Água Gelada
ROI	–	<i>Return of Investment</i>
SLA	–	<i>Service Level Agreement</i>
TCO	–	<i>Total Cost of Ownership</i>
TIC	–	Tecnologia da Informação e Comunicação
UPS	–	<i>Uninterruptible Power Supply</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

A	– Ampère;
MW	– Megawatt, Watt x10 ⁶
Ft ²	– <i>Square feet.</i> (pé quadrado);
SQM (m ²)	– <i>Square meter</i> (metro quadrado);
kW	– Quilowatt, Watt x10 ³ ;
Ud	– Unidade;
TWh	– Terawatt-hora, Watt-hora x10 ¹² ;
kWh	– Quilowatt-hora, Watt-hora x10 ³ ;
°C	– Grau Celsius;
Q	– Quantidade de calor;
T _r	– Temperatura de retorno;
T _c	– Temperatura de descarga do <i>CRAC</i> ou <i>CRAH</i> ;
T _f	– Temperatura de dispersão no ambiente;
T _s	– Temperatura de entrada no servidor (ativo de TIC);
T _h	– Temperatura de descarga do servidor (ativo de TIC);
m _f	– Massa de ar de dispersão no ambiente;
m _n	– Massa de ar de pressão negativa;
m _c	– Massa de ar de descarga dos <i>CRAC</i> ou <i>CRAH</i> ;
m _b	– Massa de ar de <i>bypass</i> ;
m _h	– Massa de ar de descarga do servidor (ativo de TIC);
m _s	– Massa de ar de entrada no servidor (ativo de TIC);
m _r	– Massa de ar de retorno ao <i>CRAC</i> ou <i>CRAH</i> ;
c	– Calor específico do ar;
mm	– Milímetro;
“	– Polegada (25,4 mm);
Pa	– Pascal;
BS	– Bulbo seco;
PO	– Ponto de orvalho;
UR	– Umidade relativa;
m	– Metro.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	18
1.1. JUSTIFICATIVA.....	18
1.2. RELEVÂNCIA DO TEMA	18
1.3. PROBLEMATIZAÇÃO	19
1.4. HIPÓTESE.....	19
1.5. OBJETIVO.....	20
1.6. MATERIAIS E MÉTODO.....	20
2. CONTEXTUALIZAÇÃO.....	22
2.1. <i>DCPI (Data Center Physical Infrastructure)</i>	22
2.2. Consumo de Energia de <i>Data Centers</i>	26
2.3. <i>Data Centers</i> para <i>Collocation</i>	28
2.4. <i>Cloud Computing</i> e <i>Hosting Data Centers</i>	29
2.5. <i>Data Centers</i> em Agências e Órgãos /Instituições Públicas	29
2.6. Transformação da Estrutura dos <i>Data Centers</i>	29
2.7. <i>Data Centers</i> Corporativos de Próprio Uso de Empresas	30
2.8. Sustentabilidade Operacional.....	32
2.9. Introduzindo o Conceito de TIC Verde.....	33
2.10. O Fluxo da Energia no <i>Data Center</i>	34
2.11. Medindo a Eficiência Energética da Infraestrutura do <i>Data Center</i>	35
2.12. Elencando as Potenciais Ineficiências Energéticas no <i>Data Center</i>	38
2.13. Analisando o Custo médio da Parada do <i>Data Center</i>	44
2.14. Conhecendo os Fenômenos Aerodinâmicos e Termodinâmicos do Processo	46
2.15. Soluções para Coordenação de Fluxos de Ar no <i>Data Center</i>	58
2.16. A Ferramenta de Simulação <i>CFD</i> Aplicada a <i>Data Centers</i>	60
3. DESENVOLVIMENTO.....	65
3.1. Definindo os Componentes do Sistema.....	65
3.1.1. Arquitetura:	65
3.1.2. Condicionadores de Ar:	66
3.1.3. Carga Térmica (<i>Racks</i> com ativos de TIC – Calor Sensível):.....	67
3.1.4. Soluções de Coordenação de Fluxo do Ar:.....	67
3.2. Modelo de Arquitetura (<i>Layout</i>) da Sala <i>Data Center</i>	69
3.3. Planejamento do Trabalho e Roteiro de Simulações	72

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO - SIMULAÇÕES EM CFD.....	73
5. CONCLUSÃO.....	102
5.1. PONTOS MAIS SIGNIFICATIVOS DOS RESULTADOS	102
5.2. TRABALHOS FUTUROS	102
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	104
GLOSSÁRIO.....	108
APÊNDICE A – Resultados Agrupados das Simulações	111

1. INTRODUÇÃO

1.1. JUSTIFICATIVA

A gestão do desempenho operacional das infraestruturas de instalações de centros de dados (*data centers*) é foco na atualidade. Essas infraestruturas são definidas como ambientes de missão crítica por terem de assegurar dependabilidade e resiliência aos equipamentos e sistemas de TIC (Tecnologia da Informação e Comunicação) que suportam. Igualmente, vem demandando progressivamente mais densidade de potência devido à consolidação de ambientes e o forte crescimento das operações virtualizadas e/ou em nuvem.

O consumo de energia, com sustentabilidade energética ou eficiência energética, é uma preocupação central dos gestores de centros de dados modernos. O processo de atualização e modernização dessas infraestruturas ou mesmo a construção de novas, implica fazê-lo com vistas aos melhores resultados operacionais, tanto pelo ponto de vista da sustentabilidade ambiental como pelo ponto de vista dos resultados de negócio, afinal estes ambientes são mantidos com objetivos comerciais.

1.2. RELEVÂNCIA DO TEMA

Analisando em detalhe o perfil de despesas operacionais de um *data center*, verifica-se que, regularmente, depois do consumo de energia dos ativos de TIC, o segundo maior consumidor de energia é o sistema de AVAC (Aquecimento Ventilação e Ar Condicionado). Isto coloca os sistemas de AVAC de centros de dados em evidência para o aprimoramento de soluções eficientes de engenharia e, conseqüentemente, buscar melhor gerir as despesas operacionais correlatas e também o aspecto sustentabilidade das soluções pelo ponto de vista do impacto ambiental dessas operações.

Este trabalho apoia-se em práticas do mercado da engenharia de *data center*, no estado da arte, segundo implementações de projetos de relevância na área, com a reunião de conceitos e indicadores, além de soluções de engenharia propostas, estudadas e implementadas por especialistas da área. Inclui uma visão técnica e pragmática de recomendações para os principais fatores que

devem ser considerados pelos projetistas e proprietários destes sistemas, facilitando a melhor escolha técnica de otimização da eficiência energética do circuito fechado de ar refrigerado entre as fontes de carga térmica do ambiente (ativos de TIC) e os equipamentos de AVAC.

1.3. PROBLEMATIZAÇÃO

O foco é o conjunto de equipamentos e acessórios utilizados para o transporte e orientação dos fluxos de ar refrigerado e aquecido, ao longo do referido circuito de ar entre cargas (ativos de TIC) e os equipamentos de AVAC.

Proprietários das instalações de infraestrutura de centros de dados e suas equipes operacionais enfrentam grande dificuldade, no dia a dia, para compreender os efeitos de pequenas modificações de arranjo físico (posição de equipamentos), instalações de cabos e acessórios ou mesmo a posição e calibração dos elementos que constituem os sistemas de AVAC que, ao longo do tempo e dessas mudanças, por melhor que tenha sido concebido e implementado o centro de dados, prejudicam o desempenho e reduzem a capacidade das instalações. Mesmo novos projetos são implementados sem cuidados especiais em relação a este importante tema.

1.4. HIPÓTESE

Desenvolvida com a confrontação de problemas e soluções, comparando resultados entre alternativas confirmadas ou rejeitadas por ferramenta de avaliação ou simulação.

No universo dos problemas foram consideradas as instalações de infraestrutura de centros de dados que regularmente apresentam condições prejudicadas para a melhor eficiência dos sistemas AVAC, isto devido ao frequente desconhecimento técnico sobre as soluções de mercado e os motivadores de suas aplicações por parte dos proprietários e equipes de gestão e operação dos ambientes de *data centers*.

No universo das soluções elencou-se as possibilidades de engenharia mais importantes, frequentes e regularmente utilizadas, consideradas o estado da arte nesta disciplina, na atualidade.

Como estratégia de apresentação foram reunidas simulações de conjuntos de problema versus solução e a correspondente simulação da condição resultante, através de *CFD (Computational Fluid Dynamics)*, demonstrando a eficácia da ferramenta de simulação no diagnóstico sobre os resultados de cada escolha.

1.5. OBJETIVO

Apresentar o *CFD (Computational Fluid Dynamics)*, adaptado para ambientes de *Data Centers* (Centros de Dados), como importante ferramenta de apoio na tomada de decisão para a identificação das melhores soluções de implementação, considerada a problemática da eficácia e eficiência dos circuitos de ar condicionado estabelecidos entre a carga térmica principal (ativos de TIC – Tecnologia da Informação e Comunicações) e os *CRAC (Computer Room Air Conditioner)* ou *CRAH (Computer Room Air Handler)*.

Com o conhecimento dos fenômenos físicos que ocorrem nestes circuitos de ar, portanto, as consequências da má gestão técnica dos componentes das instalações e equipamentos, contribui-se para uma operação eficiente, assim como para a melhor escolha de soluções, no momento da implementação de novos sistemas e recursos no sistema de condicionamento de ar.

Além da correta especificação de engenharia para os equipamentos de capacidade dos sistemas de condicionamento de ar (os condicionadores de ar), este trabalho foca na correta seleção e aplicação de soluções de separação e contenção de fluxos, para a melhor eficácia e eficiência do referido e destacado circuito de ar condicionado.

1.6. MATERIAIS E MÉTODO

Para o desenvolvimento deste trabalho foram utilizadas referências técnicas, projetos, instalações implementadas e estudos de renomados profissionais do mercado, cientistas e estudiosos do assunto, além da vivência em projetos e implementações.

1.6.1. MATERIAIS

- a) Documentos de projetos de referência (alguns restritos por contratos de sigilo com clientes)
- b) Textos e trabalhos técnicos nas disciplinas correlatas (relacionados)
- c) *Software* de simulação *CFD* StruxureWareOperationsEcostream 7.1.0-CI Schneider Electric (Cedido por Schneider Electric para este propósito)
- d) *Software* do pacote MSOffice (Word, Excel, Power Point – Licença particular)
- e) *Software* para desenho AutoCAD Autodesk Versão 2017 (Licença estudante cedida por Autodesk)
- f) *Software* para imagem de documentos eletrônicos no formato *PDF* Adobe Acrobat Reader (licença livre)

1.6.2. MÉTODO

- a) Apresentar o ambiente *data center* com breve histórico, situação atual e projeções para o futuro próximo;
- b) Apresentar a problemática, identificando os defeitos mais comuns encontrados no circuito de ar, os que se apresentam como vilões da eficiência dos sistemas de AVAC, no contexto;
- c) Demonstrar as soluções técnicas mais utilizadas e consideradas como melhores práticas para cada vetor problema;
- d) Organizar os problemas e as soluções com uma discussão prática de implementação, com formato que permita esclarecer dúvidas para melhor instrumentalizar o processo decisório de implementação;
- e) Demonstrar com imagens de modelos tridimensionais e com imagens de *CFD*, os efeitos das escolhas ruins e acertadas;
- f) Concluir com recomendações de procedimentos e melhores práticas.

Segundo Prodanov, C.C. e Freitas, E.E. (2013), este trabalho reúne características de pesquisa aplicada, explicativa, de laboratório, telematizada, bibliográfica, experimental e associada a estudo de caso (modelo).

2. CONTEXTUALIZAÇÃO

Zucchi e Amâncio (2013) esclarecem com propriedade que “a construção de um moderno centro de processamento de dados exige um correto balanço entre tendências tecnológicas, eficiência, fatores ambientais e baixo custo”.

2.1. DCPI (*Data Center Physical Infrastructure*)

Data centers são infraestruturas constituídas por edificações que recebem equipamentos, instalações e sistemas de infraestrutura predial e de apoio técnico para suportar a operação de sistemas de TIC.

Zucchi e Amâncio (2013) consideram e destacam que o desafio dos novos projetos de *data center* é conseguir maior eficiência dos diversos elementos construtivos e de instalação, o que se traduz em menor consumo. Entre os vários elementos a serem considerados, pode-se citar:

- a) Energia para alimentação dos equipamentos de rede e servidores;
- b) Ar condicionado;
- c) Geração e manutenção da energia;
- d) Elementos de detecção e combate a incêndio que não agridam a natureza e que não coloquem em risco a continuidade das atividades;
- e) Segurança e controle de acesso uma vez que os dados armazenados podem ser de extrema importância para quem os armazena.

Os *data centers* estão no centro da economia moderna, desde salas de servidores que suportam a operação de pequenas e médias organizações, passando por *data centers* corporativos de grandes empresas e também grandes *data centers* de hospedagem e para nuvem (*cloud computing*) como Amazon, Facebook, Google e outros (WHITNEY, DELFORGE, 2014).

A figura 1 mostra uma infraestrutura típica de *data center* de médio porte.

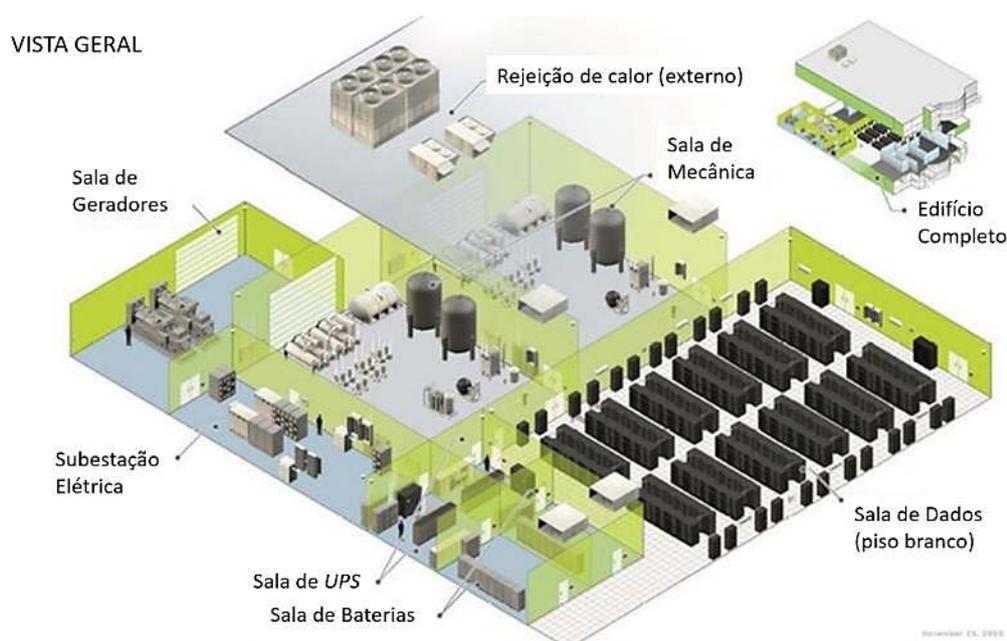


Figura 1 - Data center típico.

Fonte: adaptado de realwish.com (2002-2015)

Os *DCPI* integram, além da edificação adequadamente construída para o propósito, sistemas elétricos, mecânicos e de condicionamento de ar, além de telecomunicações, automação e segurança, como mostra a figura 2.

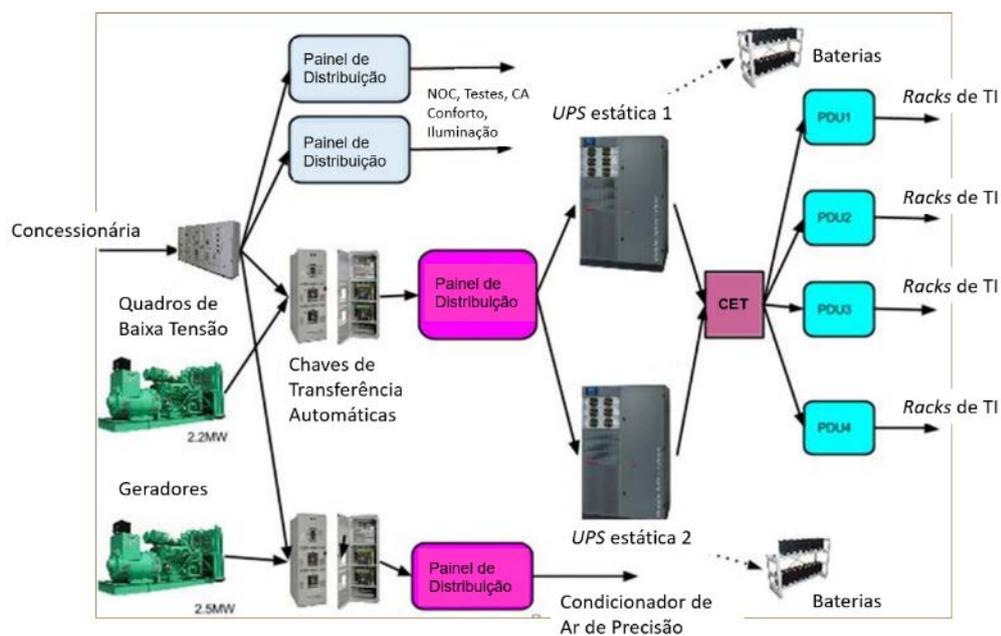


Figura 2 - Data center - Sistema elétrico - De fonte até PDU.

Fonte: adaptado de realwish.com (2002-2015)

Em topologias com redundância de alimentação, cada *rack* é alimentado com, pelo menos, dois circuitos elétricos provenientes de *PDU* (*Power Distribution Unit*) alimentadas por fontes distintas, como mostra a figura 3.

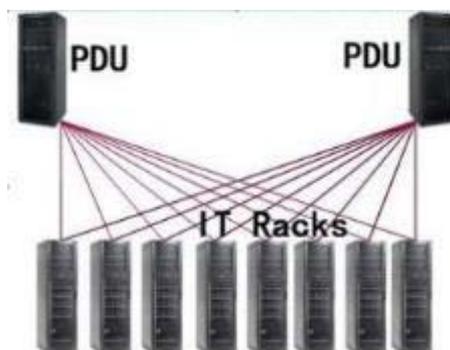


Figura 3 - Data center - Sistema elétrico típico - De PDU a rack.

Fonte: realwish.com (2002-2015)

Este trabalho está focado no circuito de ar que circula entre o *CRAH* ou *CRAC* e os *racks* como destacado na figura 4.

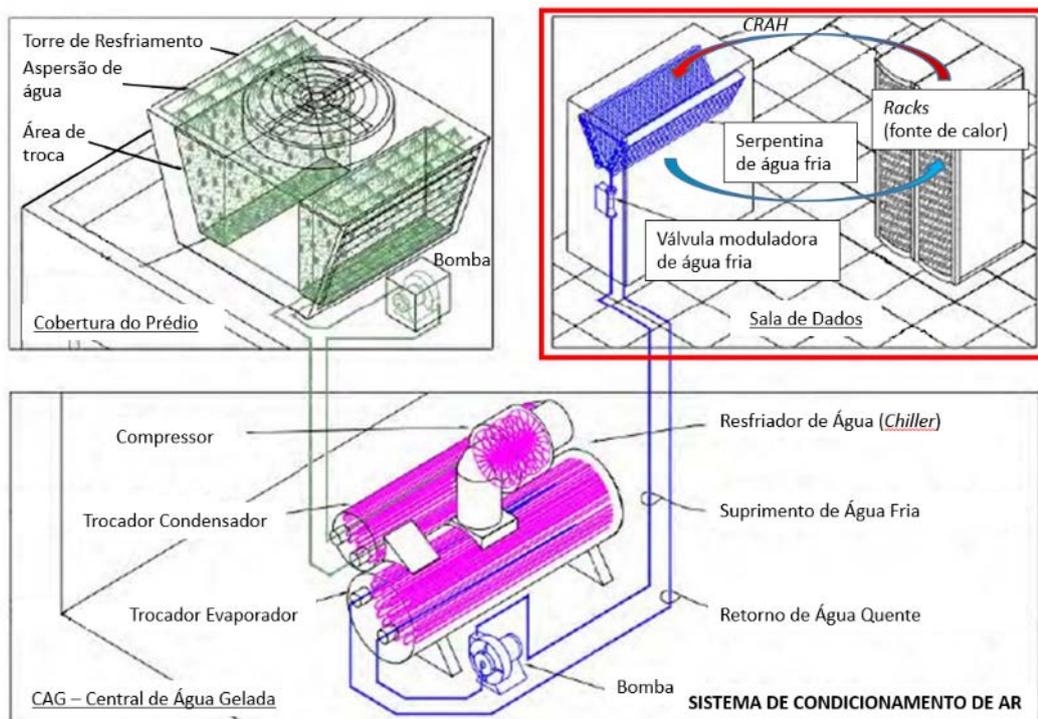


Figura 4 - Data center - Sistema VAC típico - Da rejeição ao rack.

Fonte: adaptado de realwish.com (2002-2015)

A figura 5 mostra a planta típica de um *data center* de médio porte com a localização dos *CRAH*.



Figura 5 - Data center - Planta típica - Médio porte.

Fonte: adaptado de realwish.com (2002-2015)

Castro (2010, p.58) aponta que o sistema de ar condicionado ou climatização, no *Data Center*, tem como principal finalidade combater a carga térmica dissipada pelos equipamentos de TI e Comunicações, além da infraestrutura de suporte à operação, mantendo condições ambientais que permitam uma operação contínua e sem falhas.

Segundo Andrea (2014), os *data centers*, nos dias atuais, podem ser categorizados por tamanho, como mostra a tabela 1.

Tabela 1 - Categorização de *data centers* por tamanhos.

Tamanhos de <i>Data Centers</i>		
Classificação	Quantidade de Racks [Ud]	Área [m ²]
Mega	>= 9.001	>= 22.501
Muito Grande	3.001 - 9.000	7.501 – 22.500
Grande	801 - 3000	2.001 – 7.500
Médio	201 - 800	501 – 2.000
Pequeno	11 - 200	26 - 500
Mini	1 - 10	1 - 25

Fonte: adaptado de AFCOM WP DCISE-001 (2013 p.8)

Andrea (2014) classifica a densidade de potência do *data center* pelo pico de demanda de potência elétrica, por *rack*, como mostra a tabela 2.

Tabela 2 - Classificação de densidades de carga elétrica por *rack* de *data centers*.

Densidade de Potência de <i>Data Centers</i>	
Classificação	Por Rack
Extrema	>= 16 kW
Alta	9 – 15 kW
Media	5 – 8 kW
Baixa	0 – 4 kW

Fonte: adaptado de AFCOM WP DCISE-001 (2013 p.8)

2.2. Consumo de Energia de *Data Centers*

Considerando o crescimento regular das densidades de potência dos *data centers* modernos e que densidades de 16 kW por *rack* são comuns, pode-se verificar, combinando as informações das tabelas 1 e 2, quais são as cargas elétricas para cada categoria, como mostra a tabela 3.

Tabela 3 - Demanda total de energia elétrica para TIC estimada para data centers.

Tamanho do <i>Data Center</i>	Quantidade de Racks [Ud]	Demanda [kW]
Mega	>= 9.001	>= 144.016
Muito Grande	3.001 - 9.000	48.016 a 144.000
Grande	801 - 3000	12.816 a 48.000
Médio	201 - 800	3.216 a 12.800
Pequeno	11 - 200	176 a 3.200
Mini	1 - 10	16 a 160

Fonte: adaptado de AFCOM WP DCISE-001 (2013 p.8)

O tema em discussão neste trabalho é significativo, na medida em que estes ambientes estão proliferando-se e crescendo individualmente em tamanho e capacidade e passam a ser frenéticos consumidores de energia, impactando a infraestrutura de energia e o meio ambiente do planeta.

Os grandes centros econômicos, como Alemanha e EUA (Estados Unidos da América), através de seus números, demonstram a trajetória dos últimos anos e que se pode esperar para o futuro dos *data centers*.

Hintermann (2014) descreve o cenário alemão e afirma que “em poucos anos, a estrutura dos componentes de *data centers* pode mudar completamente. Isto aplica-se não somente a um *data center* individual, mas também à estrutura do mercado de *data centers* no nível nacional e no internacional. O número de pequenas instalações está, claramente, decrescendo desde 2008, enquanto o número de grandes *data centers* está crescendo”.

Hintermann (2014) ainda conclui que existe uma forte relação entre a estrutura (tipo) do *data center* e o consumo de energia elétrica, que o número de *data centers* de *collocation* e *cloud* com mais de 5000 m² cada de espaço de TI cresce particularmente rápido e que devido à elevada proporção da participação do custo da energia elétrica em relação aos custos totais da operação de *data centers* de *collocation*, *cloud* e *hosting*, faz com que estes tenham maior incentivo para a utilização de tecnologias eficientes energeticamente.

Hintermann (2014) conclui também que existem certos limites para um futuro incremento da eficiência energética, em específico para *data centers* de *collocation*, por não haver motivadores diretos para influenciar os clientes desses

ambientes para a utilização de tecnologias de TIC mais eficientes energeticamente. Finaliza afirmando que os *data centers* vão crescer muito e que o consumo de energia destes crescerá, apesar de serem mais eficientes energeticamente. Entretanto, um salto tecnológico com a computação em nuvem é esperado.

Alguns números apresentados por Hintermann (2014) indicam que: *Data centers* consumiram 1,1% a 1,5% da energia elétrica global em 2010 (nos EUA 2,2% e na Alemanha 1,8%), o consumo global de energia elétrica de *data centers* cresceu em 56% de 2005 até 2010 e que na região de Frankfurt os *data centers* são responsáveis por mais de 20% do consumo de energia elétrica.

A figura 6 mostra a projeção do consumo elétrico dos *data centers* na Alemanha.

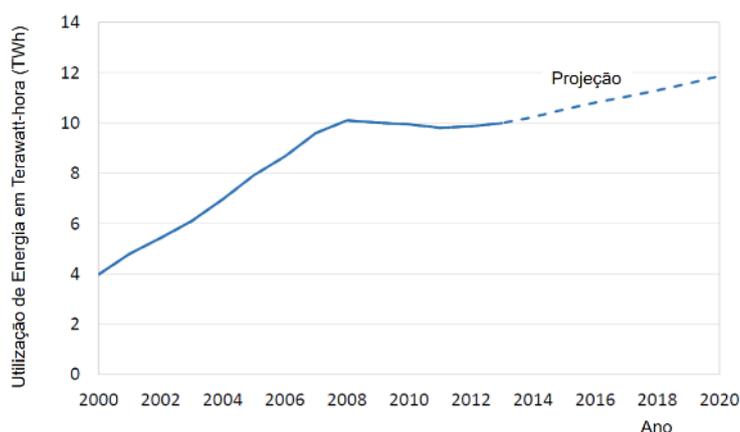


Figura 6 - Projeção do consumo elétrico por *data centers* na Alemanha.

Fonte: adaptado de Hintyermann (2013)

2.3. *Data Centers* para *Collocation*

Segundo Hintermann (2014):

- a) Mais de 200 provedores de serviços de *collocation* na Alemanha (em 2013).
- b) Aproximadamente 45% dos grandes *data centers* são para *collocation*.

- c) Os maiores *data centers* para *collocation* na Alemanha têm mais que 50.000 m² de salas para TIC e consumo de energia da ordem de 50 megawatts.
- d) Crescimento de espaço de piso para TIC em *data centers* de *collocation* na Alemanha:
 - i. +25% entre 2008 e 2013;
 - ii. 2013: 18% do total de espaços para *data center*;
 - iii. Previsão: +33% entre 2012 e 2016.

2.4. *Cloud Computing* e *Hosting Data Centers*

Segundo Hintermann (2014):

- a) Mais de 2000 provedores de serviços de *hosting* na Alemanha (em 2013).
- b) Mercado de *cloud computing*: crescimento anual estimado em 40% de 2011 a 2015.
- c) Alguns *data centers* de *cloud* e *hosting* são muito grandes. Por exemplo, o *data center* de *cloud* da Deutsche Telekom em Magdeburg tem 24.000 m².
- d) O espaço de piso para TIC de *data centers* de *cloud* e *hosting* cresceu aproximadamente 25% de 2008 a 2013, na Alemanha.
- e) 2013: 14% de todo o espaço de piso de TIC na Alemanha.

2.5. *Data Centers* em Agências e Órgãos /Instituições Públicas

Hintermann (2014) informa:

- a) Aproximadamente 5.000 *data centers* públicos na Alemanha em 2013.
- b) Aproximadamente 10% do total de espaço de *data centers*.
- c) Aproximadamente 1000 *data centers* de uso do governo federal.

2.6. Transformação da Estrutura dos *Data Centers*

Segundo Hintermann (2014):

Os tamanhos, tipos e localizações dos *data centers* estão mudando significativamente pelas seguintes razões:

- Consolidação de data centers;
- Crescimento do uso de data centers de *collocation*;
- Virtualização e *cloud computing*.

A tabela 4 mostra a distribuição tipológica usual dos *data centers*, relacionando tamanho e aplicação.

Tabela 4 - Tipologia de *data centers* (visão geral).

Tamanho do <i>Data Center</i>	Quantidade de <i>Data Centers</i> na Alemanha em 2013	Taxa de Variação 2008 a 2013	<i>Data Center</i> para <i>Collocation</i>	<i>Data Center</i> para <i>Cloud Computing e Hosting</i>	<i>Data Centers</i> Particulares	<i>Data Centers</i> Públicos
Gabinete de Servidores Até 10 m ²	Aprox. 31.000	- 8%				
Sala de servidores 11 a 100 m ²	Aprox. 18.000	+/- 0 %				
Pequeno <i>Data Center</i> 101 a 500 m ²	Aprox. 2.100	+ 23%				
<i>Data Center</i> Médio 501 a 5000 m ²	Aprox. 300	+ 27 %				
Grande <i>Data Center</i> Acima de 5000 m ²	Aprox. 70	+ 40 %				

Fonte: adaptado de Hintermann (2014)

2.7. *Data Centers* Corporativos de Próprio Uso de Empresas

- Quase 90% dos *data centers* caem nessa categoria e são pequenos gabinetes ou pequenas salas de servidores.

- *Data centers* particulares totalizaram menos que 60% do total de *data centers* na Alemanha (em 2013).
- Aproximadamente 20% dos grandes *data centers* caem nessa categoria (ex.: empresas do setor financeiro, do setor de telecomunicações ou do setor automotivo).

A figura 7 mostra a evolução do espaço de piso de TI para *data centers*, na Alemanha, por grupos de tamanhos.

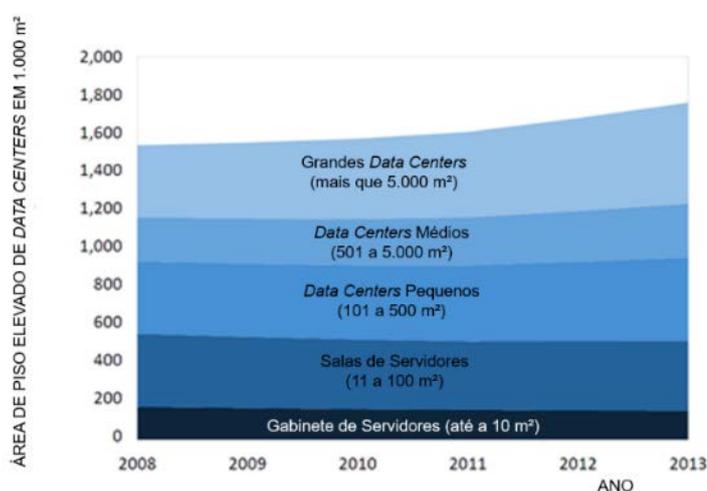


Figura 7 - Evolução do espaço de piso de TI em *data centers* na Alemanha.

Fonte: adaptado de Hintermann (2014)

Estabelecendo um paralelo, o cenário global é descrito de modo impactante através de números dessa indústria da informação, que se referem a elementos do dia-a-dia do cidadão comum e representam processos completados em *data centers*.

Whitney e Delforge (2014) resumem os dados e são:

- 2,5 bilhões de pessoas “on-line” simultaneamente ao redor do mundo (esse número cresceu 566% desde o ano de 2000);
- 70% das pessoas usam a internet diariamente;
- A cada 60 segundos 204 milhões de mensagens de e-mail são transmitidas, 5 milhões de buscas são feitas no Google, 1.8 milhão de

“likes” são registrados no Facebook, 350.000 “tweets” são enviados no Tweeter, US\$ 272,000.00 em mercadorias são vendidos no Amazon.com, 15.000 músicas são baixadas pelo “Itunes”.

Em 2011, o consumo de energia elétrica para *data centers* nos EUA, de modo aproximado, foi como indicado na tabela 5.

Tabela 5 - Consumo elétrico de *data centers*, por mercado, nos EUA.

Segmento Tipo de <i>Data Center</i>	Servidores [Milhões]	Participação no Consumo Total	Consumo Total por Ano [Bilhões de kWh]
Pequenas e Médias Salas de Servidores	4,9	49%	37,5
Corporativos / Empresariais	3,7	27%	20,5
<i>Collocation</i>	2,7	19%	14,1
<i>Cloud</i> (hiperescala)	0,9	4%	3,3
Computação de Alto Desempenho	0,1	1%	1,0
Total (arredondamento)	12,2	100%	76,4

Fonte: adaptado de Whitney e Delforge (2014 p.11)

Whitney e Delforge (2014) afirmam ainda que em 2013 os *data centers* americanos consumiram aproximadamente 91 bilhões de quilowatt-hora de energia elétrica, o que equivale a 34 grandes usinas termelétricas a carvão com 500 megawatt de capacidade cada. Estimam que o consumo de energia elétrica por *data centers* cresça aproximadamente à ordem de 140 bilhões de quilowatt-hora anualmente até 2020.

2.8. Sustentabilidade Operacional

Visto, portanto, quão impactante é a presença crescente dos *data centers* na economia global, neste trabalho analisada pelos pontos de vista do consumo de energia elétrica e da sustentabilidade ambiental, passa a ser importante entender a lógica da energia nos sistemas e processos de um *data center*, conhecendo então as parcelas de energia útil direta e indireta, as perdas, os métodos de medição, controle e mitigação de perdas, que nos levará ao desenvolvimento das simulações deste trabalho.

Instituições como o *Uptime Institute LLC* (EUA), para impulsionar a sustentabilidade operacional de *data centers*, certificam a operação destes. Como exemplo significativo no Brasil, a Telefonica Vivo (2015) teve sua operação certificada “*Tier Operational Sustainability Gold*”, o grau máximo de certificação para uma operação do gênero.

2.9. Introduzindo o Conceito de TIC Verde

Silva (2015) caracteriza TI verde, podemos considerar TIC para este contexto, com uma abordagem holística, que relaciona:

- a) Utilização verde: Redução do consumo de energia em computadores e outros sistemas de informação aplicando práticas ambientalmente corretas;
- b) Descarte verde: Reformar e reutilizar velhos computadores. Reciclar corretamente computadores e demais dispositivos eletrônicos descartados¹;
- c) Projeto verde: Projeto eficiente de energia utilizando componentes compatíveis com o meio ambiente, computadores, servidores e equipamentos de refrigeração;
- d) Fabricação verde: Fabricação de componentes eletrônicos, computadores e outros subsistemas com o mínimo ou nenhum impacto ambiental.

Murugesan (2008) apud Silva (2015, p.12), especifica as seguintes iniciativas para uma TIC ambientalmente sustentável:

- a) Projeto de sustentabilidade ambiental;
- b) Computação energeticamente eficiente;
- c) Gerenciamento de energia;
- d) Projeto de *data center* considerando layout (arranjo físico) e localização;
- e) Virtualização de servidores;

¹ Uma visão atualizada remete ao alto índice de recicláveis (100%) na construção de ativos de TIC que, combinado com processos de fabricação verdes, viabilizam atualização tecnológica pouco poluente.

- f) Descarte e reciclagem responsáveis;
- g) Conformidade regulatória;
- h) Métricas verdes, ferramentas de avaliação e metodologia;
- i) Mitigação de riscos relacionados ao meio ambiente;
- j) Uso de fontes de energia renováveis;
- k) Eco rotulagem de produtos de TI.

Mangal (2009, p.1) lembra o papel especialmente importante do *CIO* (*Chief Information Officer*) que pode e deve conduzir ações de mitigação, em TIC, para a sustentabilidade do planeta. TIC pode ser a forte contribuidora para o impacto ambiental da operação, mas se gerenciada de modo correto pode contribuir com soluções de menor impacto, sustentáveis e de custos reduzidos. Isso pode ser feito através de tecnologias verdes e métodos que permitem às corporações avaliarem, gerenciarem e reduzirem o uso de energia, o uso de água e a produção de lixo.

2.10. O Fluxo da Energia no Data Center

Dunlap e Rasmussen (2006 p.15) explicam que muitos usuários de Data Center acreditam que ter, por exemplo, 500 kW de capacidade de refrigeração significa ser capaz de instalar 500 kW de carga de TIC. A capacidade efetivamente utilizável depende da arquitetura do sistema de refrigeração. Isto é, com foco no rack, na fila de racks ou na sala.

Para detalhar o caminho da energia num *data center* moderno típico, Rasmussen (2012) apresenta, na figura 8, um fluxograma que demonstra as proporções dos caminhos da energia, para um modelo que conta com CAG (Central de Água Gelada), RAG (Rede de Água Gelada), umidificadores, *CRAH* (*Computer Room Air Handler*) / *CRAC* (*Computer Room Air Conditioner*), *PDU* (*Power Distribution Unit*), *UPS* (*Uninterruptible Power Supply* ou *No-breaks*), dispositivos de iluminação, painéis de distribuição e geradores.



Figura 8 - Fluxograma de energia através dos sistemas de um *data center* típico.

Fonte: adaptado de Rasmussen - SE WP 114 (2013 p.3)

A tabela 6 agrupa essas participações de consumo de energia para os sistemas de um *data center*.

Tabela 6 - Participações no consumo de energia de um *data center* típico.

Carga	Participação Sistema	Agrupamento	Participação Grupo
Resfriador	23%		
Umidificador	3%	AVAC	41%
CRAC/CRAH	15%		
TIC	47%	TIC	47%
PDU	3%	Elétrica Crítica	9%
UPS (No-break)	6%		
Dispositivos de Iluminação	2%	Elétrica Geral	3%
Painel de Distribuição / Gerador	1%		
Total	100%		100%

Fonte: adaptado de Whitney e Delforge (2014 p.11)

Analisando a tabela 6, verifica-se que, depois das cargas de TIC, AVAC é o segundo maior consumidor de energia de um *data center*, devendo a ele serem direcionados os esforços de otimização, os que estão ao alcance dos operadores e mantenedores das infraestruturas de apoio à operação de TIC.

2.11. Medindo a Eficiência Energética da Infraestrutura do *Data Center*

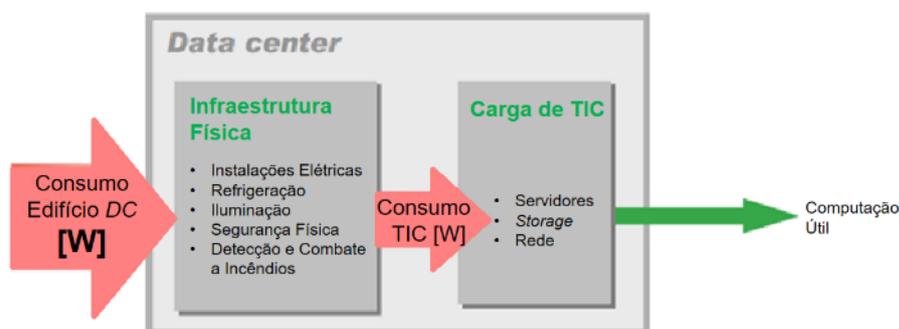
Todo sistema ou processo, para receber ações de mitigação de perdas ou eficiência reduzida, necessita ser controlado, para isso avaliado por medições e, portanto, necessita de um indicador de desempenho energético.

Avelar (2011) descreve a metodologia de cálculo de um dos principais e mais utilizado indicador de eficiência energética de um *data center*, o *PUE* (*Power Usage Effectiveness*).

O indicador *PUE* de um determinado *data center* corresponde à divisão da demanda total de energia elétrica das instalações, verificada na medição instantânea na entrada de energia da concessionária ou fonte de energia da planta e a medição da demanda de energia elétrica instantânea e sincronizada com a primeira, dos ativos de TIC.

Avelar (2011) detalha considerações e cuidados na obtenção e cálculo do *PUE*. Avelar, Azevedo e French (2012) detalham, em publicação do “*the green grid*”, todas as variações e possibilidades, assim como técnicas e melhores práticas para a obtenção e utilização adequada do *PUE*.

A figura 9 esquematiza a razão de cargas para o cálculo do *PUE*.



***PUE* – Power Usage Effectiveness (Eficiência de Utilização de Energia)**

$$PUE = \frac{\text{Consumo do Edifício DC}}{\text{Consumo de TIC}} \quad (\text{Número adimensional} > 1)$$

Figura 9 - Cálculo do *PUE*.

Fonte: adaptado de Avelar - SE WP 158 (2011 p.4)

O “*the green grid*” igualmente propõe o indicador *DCiE* (*Data Center infrastructure Efficiency*) que é a razão inversa do *PUE*. Enquanto o *PUE* resulta um número adimensional maior que um(1), sendo um(1) para o *data center* ideal

e números maiores para os menos eficientes, o *DCiE* será um número menor que um(1).

Definido e compreendido o indicador, faz-se importante verificar as condições dos *data centers* reais em termos de *PUE*, para assim situar a eficiência energética dessas instalações. O quadro 1 mostra as classes e, em notas, detalhes dos tamanhos de *data centers* regularmente associados aos valores de *PUE*.

Quadro 1 - Classificação da eficiência através do *PUE* de *data centers*.

Faixa de <i>PUE</i>	Classificação da Eficiência do Data Center Segundo o <i>PUE</i>
1,00< <i>PUE</i> <1,25	<i>DC</i> altamente eficiente (<i>Green Grid</i> ² <i>PLATINUM</i>)
1,25< <i>PUE</i> <1,43	<i>DC</i> eficiente (<i>Green Grid</i> <i>GOLD</i>)
1,43< <i>PUE</i> <1,67	<i>DC</i> relativamente eficiente (<i>Green Grid</i> <i>SILVER</i>)
1,67< <i>PUE</i> <2,00	<i>DC</i> pouco eficiente (<i>Green Grid</i> <i>BRONZE</i>) ³
2,00< <i>PUE</i> <2,50	<i>DC</i> ineficiente (<i>Green Grid</i> <i>RECOGNIZED</i>) ⁴

Fonte: adaptado de The Green Grid. www.thegreengrid.org.

Sendo o *PUE* uma medida de eficiência instantânea consequente de fatores que afetam, de modo destacado, a eficiência dos sistemas de AVAC, considerando os demais fatores intervenientes mais estáveis, a variação sazonal das condições climáticas da região de instalação do *data center* afeta o comportamento do *PUE* ao longo do ano segundo um perfil de variação igualmente sazonal. Este perfil pode ser observado, para uma determinada instalação numa região do interior do estado de São Paulo, Brasil, como mostra a figura 10.

² "Green Grid Org" é uma organização sem fins lucrativos formada por um consórcio de empresas de tecnologia, usuários e projetistas de instalações de *DC* (www.thegreengrid.org).

³ Maioria dos *DC* de médio e grande portes.

⁴ Maioria dos *DC* de pequeno porte.

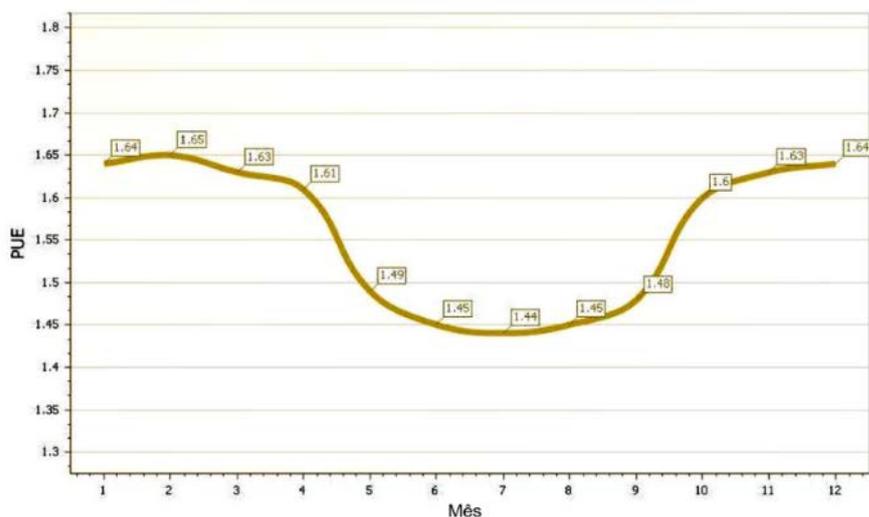


Figura 10 – Exemplo de evolução sazonal do *PUE* para um *data center*.

O caminho natural da busca pela eficiência energética otimizada em um *data center* passa por buscar um *PUE* otimizado. Para isso, mitigar perdas onde possam ocorrer é uma busca permanente.

2.12. Elencando as Potenciais Ineficiências Energéticas no *Data Center*

Ineficiências energéticas nos sistemas de um *data center* típico, os da grande média e com *PUE* situado na faixa de 1,67 a 2,5, caracterizam-se por perdas de eficiência comuns do dia a dia de instalações, cujos projetos, operação e manutenção ainda não alcançaram um nível de maturidade com otimização relevante.

Estas perdas, as principais, são prontamente identificáveis e podem ser apresentadas de modo resumido.

Rasmussen (2012) organiza os focos de potencial redução da ineficiência, os quais complemento, como mostra o quadro 2.

Quadro 2 - Focos de potencial redução da ineficiência energética no *data center*.

Núcleo	Causa	Ação Mitigatória
TIC Operação	Ativos sem uso, ligados e consumindo energia. (“ <i>Comatose</i> ” ⁵).	Descomissionamento e remoção. ⁶
TIC Operação	Ativos obsoletos sem gerenciamento de energia e de alto consumo.	Atualização de ativos.
TIC Planejamento	Baixa utilização de ativos. (Ex.: servidores).	Atualização e padronização de ativos.
TIC Planejamento	Dificuldades operacionais por obsolescência e capacidade.	Gestão e decisão por <i>TCO</i> ⁷ e <i>ROI</i> ⁸ , além de <i>CAPEX</i> ⁹ e/ou <i>OPEX</i> ¹⁰ .
<i>DCPI</i> Projeto	Subutilização e sobre utilização, forçando redução do <i>MTBF</i> e da eficiência.	Correto dimensionamento.
<i>DCPI</i> Projeto	Tecnologias desatualizadas e de alto consumo de energia.	Substituição por equipamentos modernos e eficientes.
<i>DCPI</i> Projeto	Inadequação da topologia afetando a dependabilidade. ¹¹	Correta especificação e eventual hibridização ¹² de topologias para otimização de redundâncias.
<i>DCPI</i> Operação	Mudanças precipitadas sem respeito às premissas de projeto, não necessariamente rápidas.	Mudanças e atualizações através de sistema de gerenciamento de mudanças eficaz.
<i>DCPI</i> Operação	Abandono de infraestrutura obsoleta e ociosa (cabos elétricos e de telecomunicações e infraestruturas de suporte), resultando obstrução física e dificuldades para a operação.	Descomissionamento e remoção.
<i>DCPI</i> Operação	Operações e manobras não previstas nas sequências de operações de projeto.	Processos e métodos adequados e alinhados com a tecnologia e com mão de obra capacitada.
<i>DCPI</i> Manutenção	Não observação dos planos de manutenção especificados em projeto e por fabricantes.	Comparação dos custos de falha ¹³ com os de manutenção e implementação de manutenções preventiva e preditiva.
<i>DCPI</i> Manutenção	Utilização de componentes e insumos não especificados por projeto ou fabricantes.	Gestão e decisão por <i>TCO</i> e <i>ROI</i> , ao invés de exclusivamente <i>CAPEX</i> ou <i>OPEX</i> .

Fonte: adaptado de Rasmussen (2012)

⁵ Whitney e Delforge (2014): *Comatose* ou Coma – 20% a 30% dos ativos de TIC fora de uso, ligados, sem que alguém saiba.

⁶ Whitney e Delforge (2014): Somente UOL, nos EUA, reduziu a carga em 9MW em 2013 com o descomissionamento de servidores, economizando US\$ 5 milhões.

⁷ *TCO: Total Cost of Ownership* – Custo Total de Propriedade: custo de aquisição operação e manutenção.

⁸ *ROI: Return of Investment* – Retorno do Investimento: compensação econômica pelo capital investido.

⁹ *CAPEX: Capital Expenditure* – Despesas de Capital: na aquisição de bens de capital.

¹⁰ *OPEX: Operation Expenditure* – Despesas de Operação: na condução das operações de produção do negócio.

¹¹ Weber (2012) esclarece “dependabilidade” (ver termos e abreviaturas)

¹² No contexto, refere-se à composição de topologias padrão (Tiers I, II, III e IV, segundo o “Uptime Institute”).

¹³ Inclui interrupção dos serviços de TIC, se ocorrer, e seus custos diretos e indiretos (ex.: impacto no mercado).

Situações como as indicadas no quadro 2, em “Causa”, podem ser vistas na figura 11.



Figura 11 - Condição prejudicada de operação de ativos de TIC.

Pode-se relacionar:

- a) Cabos obstruindo a passagem do ar;
- b) Aberturas e passagens livres entre e através do *rack*;
- c) Recirculação superior e lateral;
- d) Equipamentos não operacionais e ligados;
- e) Coordenação de fluxo inadequada.

Rasmussen (2012) também mostra as potenciais economias ao desenvolver práticas adequadas, como listadas no quadro 3.

Quadro 3 - Práticas adequadas para economia de energia em *data centers*.

Prática	Economia possível	Orientação
Dimensionamento do <i>DCPI</i>	10% a 30%	- Arquitetura modular e escalável
Virtualização de servidores	10% a 40%	- Redução do espaço físico ocupado
Arquitetura de AVAC	7% a 15%	- Adensamento = refrigeração mais eficiente - Caminhos de ar mais curtos - Temperaturas de suprimento e retorno maiores
Operação de AVAC	4% a 15%	- Economizadores (<i>Free Cooling</i>) ¹⁴
Layout físico da sala	5% a 12%	- Arranjo de corredores quentes e frios
Sistema de energia	4% a 10%	- Preparado para modo redundante (baixa carga) ¹⁵
Coordenação de <i>CRAH/CRAC</i>	0% a 10%	- Automação de grupo sem conflitos ¹⁶
Placas de piso elevado	1% a 6%	- Colocação estratégica alinhando o fluxo com a demanda
Iluminação eficiente	1% a 3%	- Luzes <i>LED</i> ¹⁷ e sistema <i>lights-off</i> ¹⁸
Painéis de bloqueio de fluxo	1% a 2%	- Placas e planos cegos fecham <i>racks</i> e filas

Fonte: adaptado de Rasmussen (2012, p.11) - resumo

Na busca das ineficiências, busca-se as causas-raízes nos equipamentos e sistemas. Entretanto, o erro humano no projeto, implementação, operação e manutenção de sistemas é o principal causador de falhas até catastróficas em sistemas tecnológicos.

Ammerman (1998) apud Aguiar (2014), esclarece causa-raiz como a causa que se corrigida, prevenirá a recorrência do problema. É a causa mais básica, ou seja, a razão para a ocorrência do problema. A causa-raiz é aquela que se não existisse, o problema não existiria.

Processos e métodos, ferramentas e tecnologia, destinam-se ao aperfeiçoamento das tarefas humanas básicas, viabilizando o empenho da mente humana para o distinto exercício da criatividade. Sampaio (2002) enfatiza, para sua pergunta “ Errear é humano? ”, que uma das principais tarefas de uma

¹⁴ *Free Cooling*: Capacidade de trocar calor com o clima frio externo sem o uso de sistemas refrigerantes.

¹⁵ Equipamentos com curvas de eficiência planejada para baixa carga, comum em sistemas redundantes.

¹⁶ *CRAHs/CRACs* que refrigeram, aquecem, umidificam e desumidificam coordenadamente e não “lutam”.

¹⁷ *LED*: *Light Emission Diode* (baixo consumo de energia).

¹⁸ *Lights-Off*: Circuitos de iluminação controlados por sensores de movimento. Normal apagado.

gestão de recursos humanos responsável é “proporcionar a obtenção de elevados níveis de responsabilização e empenhamento profissionais, através do estabelecimento de tarefas criativas e de uma efetiva visibilidade da contribuição individual, para a concretização dos objetivos comuns.

O Ponemon *Institute* publicou estudo sobre paradas em *data centers* denominado “2013 Study on Data Center Outages”. O instituto preparou uma bateria de perguntas e enviou aos gerentes de *data centers* que responderam, entre outras, às seguintes perguntas com alternativas para respostas: “ Q19a. Você conhece as causas-raízes de paradas não planejadas experimentadas nos últimos 24 meses? ”.

As respostas, a esta pergunta, foram como indica o quadro 4.

Quadro 4 - Questão 19a do inquérito Ponemon 2013 - Paradas de *data centers*.

Alternativas	Distribuição
Sim, todas as paradas não planejadas	21%
Sim, a maior parte das paradas não planejadas	30%
Sim, algumas das paradas não planejadas	32%
Não	17%
Total	100%

Fonte: adaptado de Ponemon *Institute* (2013, p.27)

A pergunta seguinte foi: “ Q19b. Se sim, por gentileza marque a causa-raiz das paradas não planejadas experimentadas no ano passado. Escolha todas as respostas aplicáveis. ”

Para esta questão, as respostas foram como indica o quadro 5.

Quadro 5 - Questão 19b do inquérito Ponemon 2013 - Paradas de *data centers*.

	Alternativas	Distribuição
a.	UPS – Falha de equipamento	27%
b.	UPS – Falha de bateria	55%
c.	ATS (<i>Automatic Transfer Switch</i>)– Falha de equipamento	15%
d.	Gerador – Falha de equipamento	20%
e.	PDU / Disjuntor – Falha de equipamento	26%
f.	TIC – Falha de equipamento	33%
g.	Acionamento de desligamento de energia / erro humano	48%
h.	Falhas relacionadas ao sistema de AVAC / falha de CRAC	29%
i.	UPS – Capacidade excedida	46%
j.	Vazamento / entrada de água	32%
k.	Falhas relativas a condições climáticas	30%
l.	Ataque cibernético (ataque de <i>hackers</i>)	34%
m.	Instalação inadequada de ativos durante uma transferência ou alteração	15%
n.	Falha de painel elétrico	13%
o.	Outros (gentileza especificar)	0%

Fonte: adaptado de *Ponemon Institute* (2013, p.27)

Analisando os dados do quadro 5, sem buscar níveis profundos de relação causal, apenas em primeiro nível, verifica-se que os itens (g), (i) e (m) estão diretamente relacionados à qualidade do trabalho humano desenvolvido na atividade diretamente relacionada ao efeito “parada / falha”, portanto pode-se qualificá-lo como causa. Para aproximadamente metade dos *data centers* pesquisados o erro humano desponta como principal causa das paradas não planejadas. É possível concluir que pesquisando causas-raízes em cada uma das demais alternativas, encontrar-se-á o erro humano como causador dos erros que se manifestam na falha de um sistema ou componente, ou mesmo atuação devida diante de um estado indevido, mas que resulta em parada não planejada e indisponibilidade de serviço.

2.13. Analisando o Custo médio da Parada do *Data Center*

Faz-se relevante o conhecimento do impacto financeiro da interrupção do funcionamento do *data center*, no sentido que se interrompe a prestação do serviço de dados ao usuário. Tais custos incluem, não somente as consequências diretas de restabelecimento da operação, como substituição de componentes e equipamentos e/ou a mão de obra técnica requerida para o restabelecimento da operacionalidade (ações corretivas), mas também o impacto mercadológico para a marca ou empresa devido à insatisfação do usuário, por ter se frustrado ao buscar determinada solução ou serviço. Além e de difícil computo estão os custos do usuário por ter incorrido em prejuízos diretos e indiretos por ter sido privado do resultado do serviço de TIC, no exato momento em que precisou (ou muitos milhares precisaram).

O *Ponemon Institute* também publicou em 2016 outro estudo intitulado “*Cost of Data Center Outages*” ou “Custo de Paradas de *Data Centers*”. Este estudo apresenta valores coletados no mercado de *data centers* e são representativos para suportar o processo decisório dos gerentes de *data centers* que, assim podem melhor avaliar as vantagens e desvantagens para investir em soluções modernas e eficazes para a mitigação de falhas e o incremento da dependabilidade e resiliência dos *data centers*. A figura 12 mostra os referidos dados.

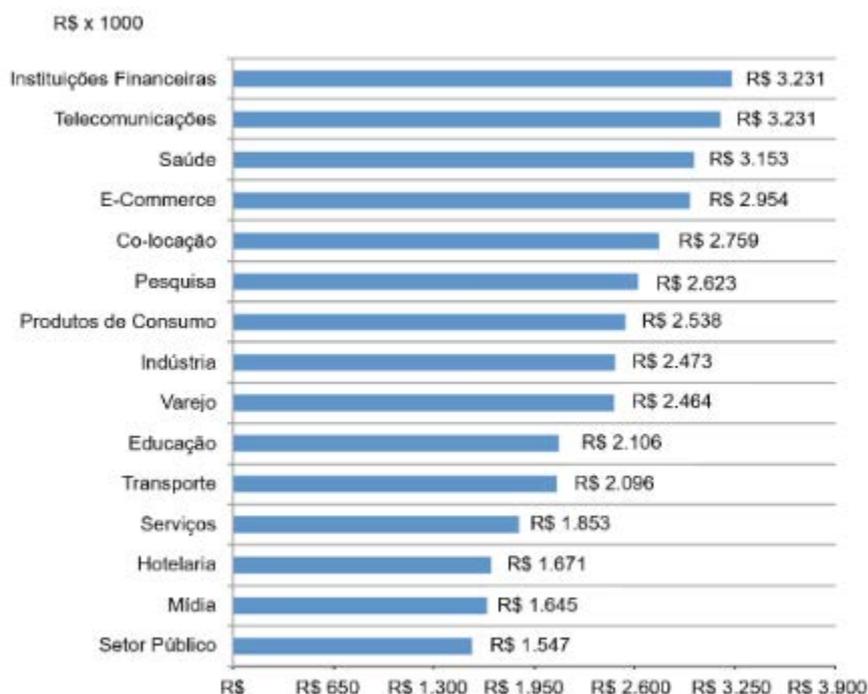


Figura 12 - Custo de interrupção de DCs em R\$x1000, por mercado (2016).

Fonte: adaptado de *Ponemon Institute* (2016, p.12)

Uma interpretação, como exemplo: no mercado de telecomunicações uma interrupção custa, em média, R\$ 3.231.000,00. Os valores foram convertidos em outubro de 2016 a R\$ 3,25/US\$.

O estudo do *Ponemon Institute* ainda apresenta dados complementares que permitem o refinamento de cálculos como para o tamanho do *data center*.

Ao desenvolver cálculos de *ROI* (*Return of Investment*) e *TCO* (*Total Cost of Ownership*), o gerente do *data center* pode decidir com clareza sobre as vantagens de investir, na estabilidade do ambiente, com soluções de tecnologia que o ajudem a evitar as paradas indesejadas.

2.14. Conhecendo os Fenômenos Aerodinâmicos e Termodinâmicos do Processo

Sendo o tema deste trabalho foco de atenção no mercado de *data centers* por ser potencializador de resultados operacionais, especialistas do mercado internacional têm estudado o assunto.

Têm sido desenvolvidos excelentes resultados, com métodos de análise e entendimentos para os fenômenos que se desenvolvem com as massas de ar em circulação no ambiente da sala de dados de um *data center*.

Salim (2010), Tozer (2009/2010) apud Salim (2010) e Kurkjian (2009) apud Salim (2010), com muita propriedade tratam o tema como descrito nos parágrafos seguintes.

“A demanda de energia do *data center* tem crescido constantemente enquanto que as densidades têm crescido exponencialmente alinhadas com a lei de Moore¹⁹. Essas densidades estão movendo os limites dos projetos das infraestruturas de refrigeração e forçando repensar-se os fundamentos da coordenação do fluxo de ar nos *data centers*” (SALIM, 2010 p.1).

Como está demonstrado neste trabalho, um grande motivador das perdas de eficiência nestes sistemas é a mistura de ar-condicionado frio (sendo suprido à sala de dados e à carga) com o ar quente (sendo devolvido ao *CRAC/CRAH*) e, desta forma, não desenvolvendo adequadamente o trabalho de transporte de calor da fonte para o sistema de rejeição, para o qual aquela massa de ar foi planejada.

Os fluxos de ar no *data center* foram classificados em cinco (5) tipos, a saber (SALIM 2010):

- a) Fluxo do *CRAC/CRAH* (Mc): Vazão total de ar que passa pelas unidades *CRAC/CRAH* e é normalmente maior do que o requerido pelos servidores, isto devido às demandas parciais de TIC (N. do A.: não as máximas) e os *CRAC/CRAH* de redundância que são mantidos em operação.
- b) Fluxo de Pressão Negativa (Mn): Na prática esse fluxo é pequeno e até desprezível, mas esse fluxo é encontrado nas proximidades da descarga

¹⁹ Gordon Moore, fundador da Intel (1965), afirmou que a capacidade de instalar componentes em um microchip dobraria a cada 18 meses (WhatIs.com). Aplica-se à capacidade de processamento. (N. do A.)

das unidades *CRAC/CRAH* onde as velocidades do ar são altas, por exemplo, em grelhas difusoras de piso, aberturas de piso, bordas de placas de piso elevado, no perímetro da sala e no perímetro das unidades *CRAC/CRAH*.

- c) Fluxo de *Bypass* (Mbp): É o fluxo que deixa as grelhas de piso (N. do A.: ou placas perfuradas do piso elevado) e retorna diretamente para as unidades *CRAC/CRAH* sem refrigerar os ativos de TIC.
- d) Fluxo de Recirculação (Mr): É o ar (N. do A.: mais quente) descarregado pelos servidores que retorna e se mistura com o ar entrando nos servidores para refrigerá-los.

As figuras 13, 14 e 15 mostram os fenômenos relacionados ao fluxo de ar, que ocorrem entre os *CRAC/CRAH* e o *rack* de servidores. As setas indicam as direções e os sentidos dos fluxos.

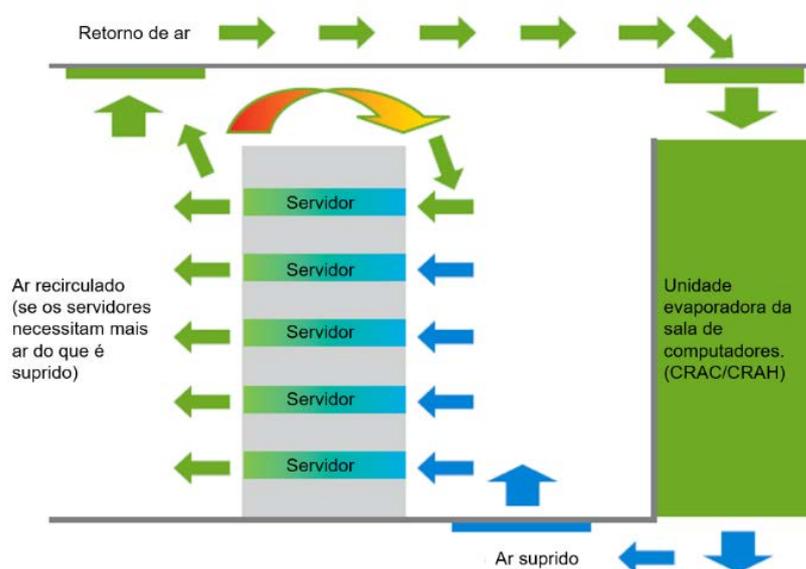


Figura 13 - Fluxo de recirculação.

Fonte: adaptado de Salim (2010, p.80 S-4)

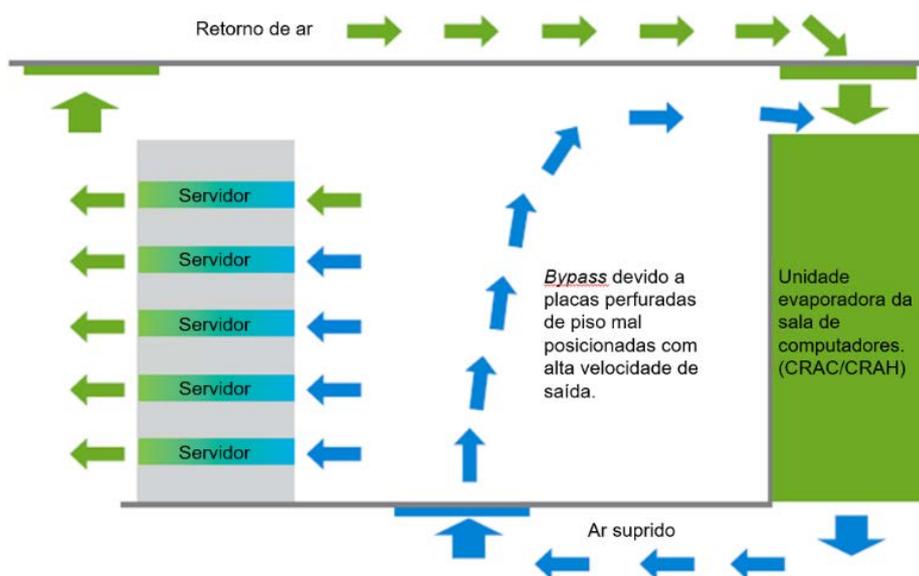


Figura 14 - Fluxo de bypass.

Fonte: adaptado de Salim (2010, p.81 S-4)

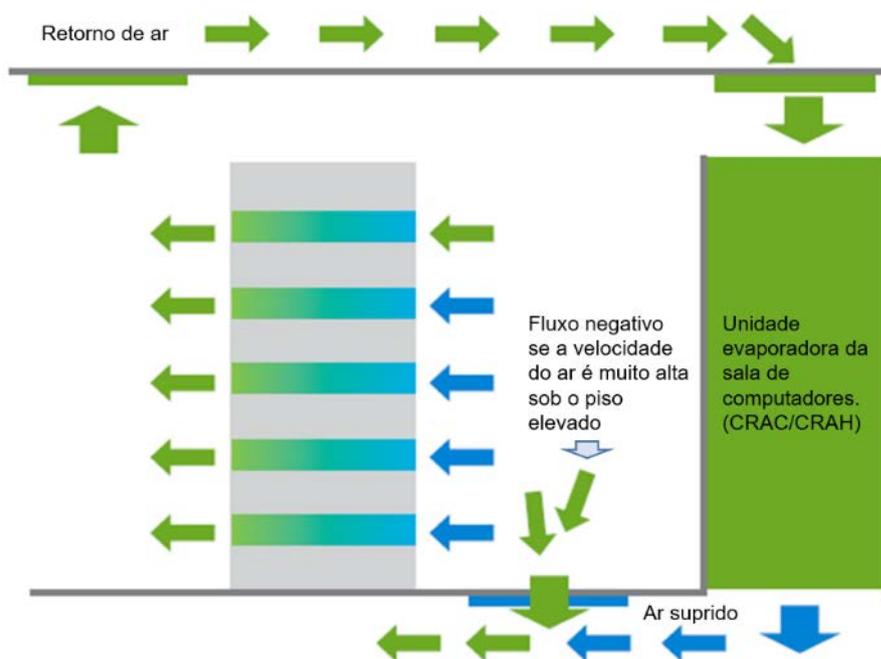


Figura 15 - Fluxo de pressão negativa.

Fonte: adaptado de Salim (2010, p.81 S-4)

A figura 16 ilustra com imagens de *CFD*, o efeito da separação utilizando um painel cego vertical num espaço aberto entre *racks*. O fenômeno da recirculação fica contido, se não muito minimizado.

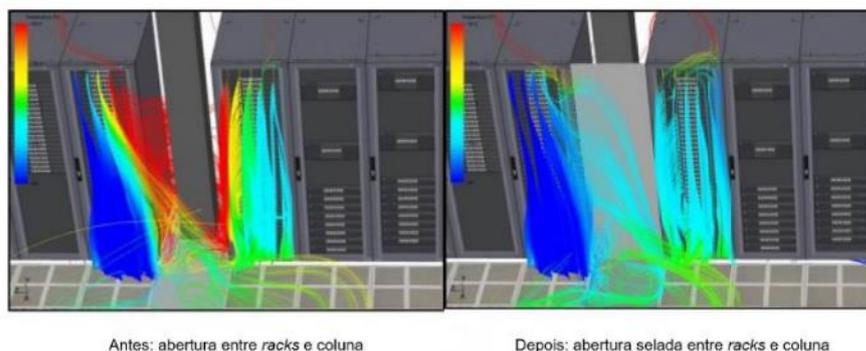


Figura 16 - Separação de fluxo entre *racks* - painel cego.

Fonte: adaptado de Strong (2014, www.upsite.com)

Esquematizando, Salim (2010) define equações que relacionam estes fluxos com os principais parâmetros que são as taxas de vazão mássica de ar²⁰ e as temperaturas e são utilizadas para expressar a quantidade e qualidade de energia movida dos servidores. Essas métricas de gerenciamento do ar são baseadas tão somente nas cargas de calor sensível.

A Figura 17 mostra um diagrama dos circuitos estabelecidos pelos fluxos de ar as relações as temperaturas em posições específicas.

As temperaturas encontradas em *data centers* típicos são:

- a) $T_r = 21\text{ °C}$, para temperatura do ar de retorno para o *CRAC* (*return air*);
- b) $T_c = 14\text{ °C}$, temperatura de descarga do *CRAC*;
- c) $T_f = 14.1\text{ °C}$, temperatura de dispersão no ambiente (grelhas de piso - *floor*);
- d) $T_s = 21\text{ °C}$, temperatura de entrada do ar no ativo de TIC (mistura do ar das grelhas de piso com o ar de recirculação - *server inlet*);
- e) $T_h = 28\text{ °C}$, temperatura do ar de descarga dos ativos de TIC (antes da mistura com ar frio de bypass - *hot air*).

²⁰ Vazão de ar medida pela razão da massa no tempo, à uma determinada massa específica (ρ)

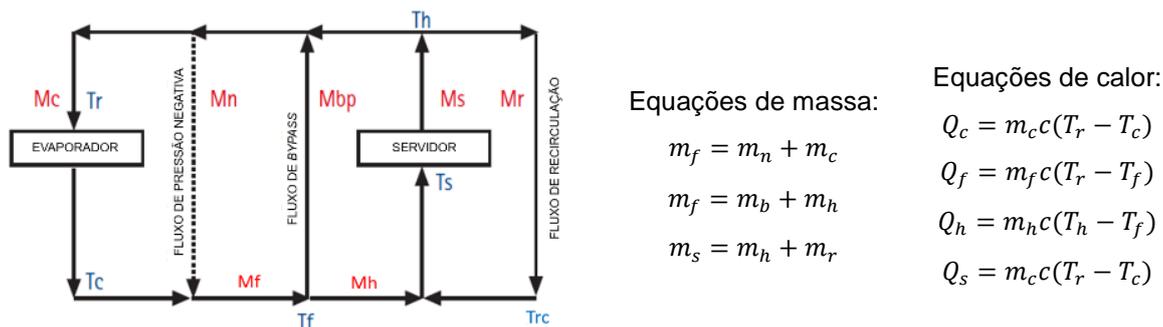


Figura 17 - Diagrama de circuitos de ar na sala de dados.

Fonte: adaptado de Salim (2010, p.80 S-4)

A coordenação e gestão dos fluxos de ar para um processo eficiente exige, portanto, que os fluxos de pressão negativa, bypass e recirculação sejam reduzidos. Isto é possível através da imposição de separação física. Numa visão simplificada do ambiente temos essa condição como mostra a figura 18.

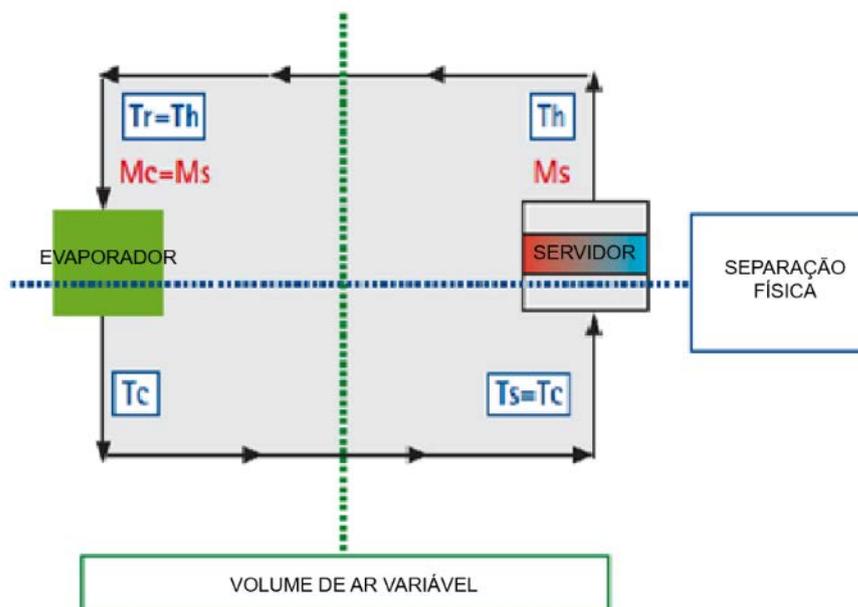


Figura 18 - Coordenação de fluxos de ar por separação.

Fonte: adaptado de Salim (2010, p.85 S-4)

A providência básica de coordenação e separação de fluxos é a disposição dos ativos de TIC dentro dos *racks* de forma a organizar as faces (grelhas) de captação de ar frio e as faces (grelhas) de descarte de ar quente, além de posicionar os *racks* de modo ordenado a configurar corredores inteiros quentes e frios. Não somente, ainda segundo Salim (2010), outros principais métodos de coordenação e separação dos fluxos são:

- a) Enclausuramento de corredores quentes;
- b) Enclausuramento de corredores frios;
- c) *Racks* enclausurados na descarga (N. do A.: chaminé).

Em quaisquer dos casos, a disposição e a especificação técnica de grelhas e difusores de ar frio, grelhas de retorno e placas perfuradas de piso elevado (quando existente cada elemento destes) são fundamentais.

Os ativos de TIC devem ser corretamente organizados no interior dos *racks*, de modo a evitar aberturas (passagem livre do ar por fora dos equipamentos ou fluxo sem efeito), assim otimizando o contato do ar frio com as partes quentes.

Quando não utilizadas soluções como corredores frios ou quentes enclausurados, ou ainda *racks* enclausurados, não é uma boa prática a concentração de ativos de TIC na parte superior do *rack*, devido à recirculação e, portanto, a concentração de ar quente (maiores temperaturas) nessas regiões.

Cada posição de instalação de ativos de TIC não ocupada, nos *racks*, deve ser fechada com painéis cegos, disponíveis com várias alturas de diferentes múltiplos de UR (Unidade *Rack* – cada UR mede 44,45 mm ou 1.75”), como mostra a figura 19.



Figura 19 - *Rack* típico com painel de fechamento.

O fluxo de ar parcialmente coordenado em um *rack* típico é mostrado na figura 20.

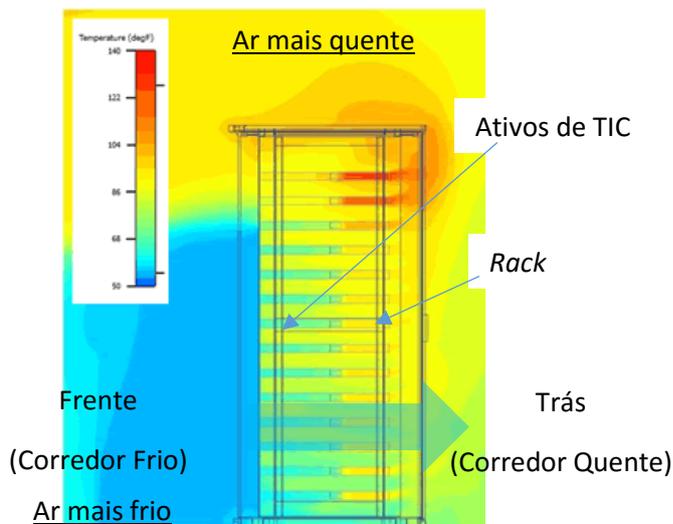


Figura 20 - Fluxo de ar no rack.

Fonte: adaptado de SIEMON (2016)

Já a figura 21 mostra o fluxo de ar típico em uma instalação de corredores frios e quentes.

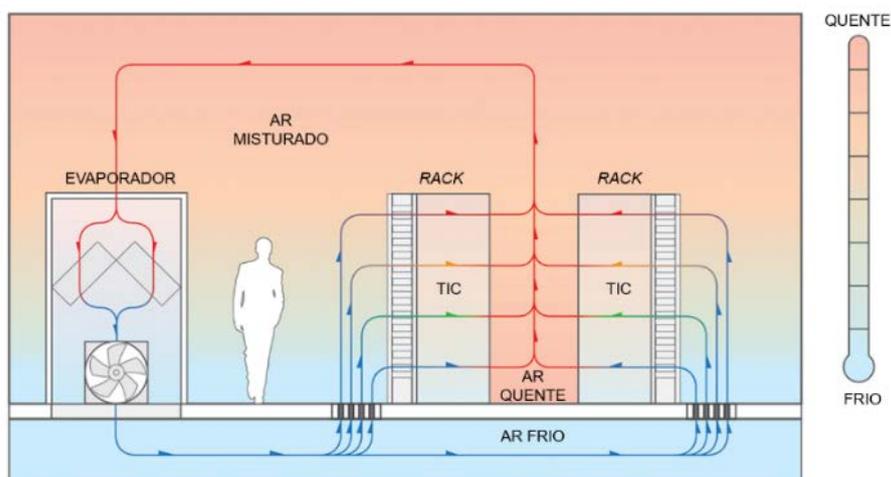


Figura 21 - Fluxo de ar na sala.

Fonte: adaptado de Sasser (2016, p.4)

Corredores quentes enclausurados, como mostra a figura 22, oferecem excelentes condições térmicas de trabalho para os técnicos, pois a maior parte da sala é mantida a temperaturas mais baixas. Para trabalhos nas partes traseiras dos racks, ou nos corredores quentes, a abertura de portas ou o provisionamento temporário de uma placa perfurada de piso no corredor da atividade pode adequar a temperatura ao trabalho.

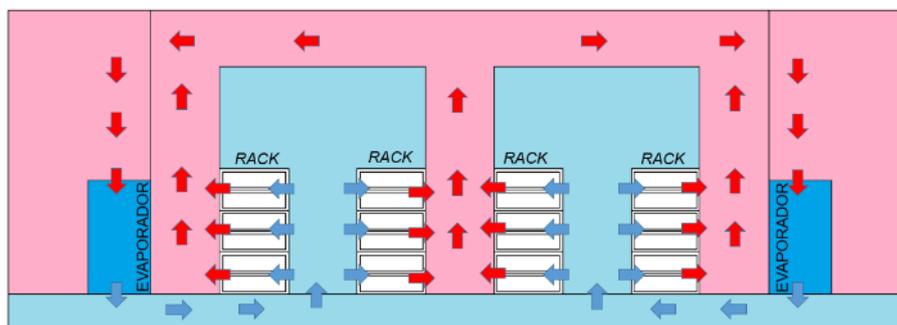


Figura 22 - Arranjo de corredores quentes enclausurados.

Fonte: elaborado pelo autor

Corredores frios enclausurados, como mostra a figura 23, mais simples e baratos, configuram uma solução adequada para infraestruturas existentes e que precisam de adequação, pois não interferem com calhas e leitos de cabos de telecomunicações e de cabos elétricos instalados por sobre os *racks*. Contudo, devido às crescentes densidades de potência e, portanto, das temperaturas de descarga, não se configuram uma solução ideal para longo prazo, em ambientes com esta expectativa, ou para projetos de alta densidade.

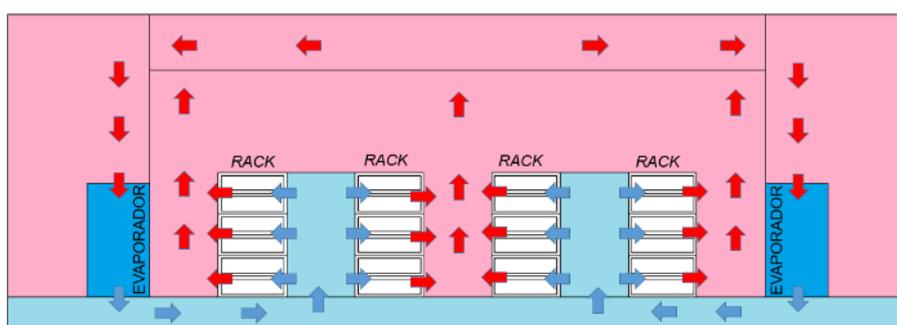


Figura 23 - Arranjo de corredores frios enclausurados.

Fonte: elaborado pelo autor

Racks enclausurados ou com dutos de descarga (chaminés), como mostra a figura 24 vem sendo progressivamente mais empregados para casos de alta densidade de potência. Entretanto, exigem cuidados especiais com os sistemas de iluminação, sistema de detecção de fumaça e calor e também com o sistema de extinção por gás inerte ou *sprinklers* de água, pois o espaço entre corredores fica, muitas vezes, completamente obstruído e isolado.

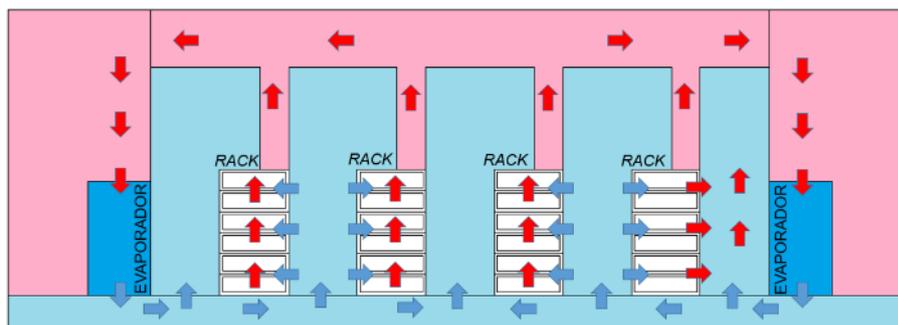


Figura 24 - Racks enclausurados na descarga.

Fonte: elaborado pelo autor

Salim (2010) ainda alerta para que os *CRAC/CRAH* sejam controlados pela temperatura de insuflamento (ar suprido ao sistema) e pelo volume de ar (controle de pressão diferencial entre o volume de suprimento e o de retorno).

Equipamentos mais antigos são controlados pela temperatura do ar de retorno. Dessa forma, *CRAC/CRAH* com carga próxima mais elevada operará com uma diferença de temperatura maior com a temperatura de insuflamento menor, variando intensamente as temperaturas de captação das cargas. Para assegurar o melhor controle e regulação das temperaturas de captação das cargas é melhor controlar a temperatura do ar suprido ao sistema.

Quanto às pressões, implementadas as técnicas de enclausuramento, os *CRAC/CRAH* agora estarão efetivamente em série com os ventiladores dos ativos de TIC. Deve-se, portanto, buscar a mínima diferença entre as regiões de captação e exaustão dos ativos de TIC, com pressões não superiores no lado de descarga, o que pode promover contrafluxo que provoca o superaquecimento e também com pressões não superiores no lado de captação, o que pode induzir o *bypass* e o fluxo adicional desnecessário. A pressão no lado de captação deve ser ligeiramente mais alta que do lado de descarga.

Adicionalmente, todo o sistema deve ser balanceado para ser mantido com uma pressão levemente superior à pressão atmosférica na sala de dados, prevenindo a admissão de umidade e poeira por passagens e frestas.

A figura 25 mostra o perfil adequado de pressões, ao longo do fluxo de ar na sala de dados.

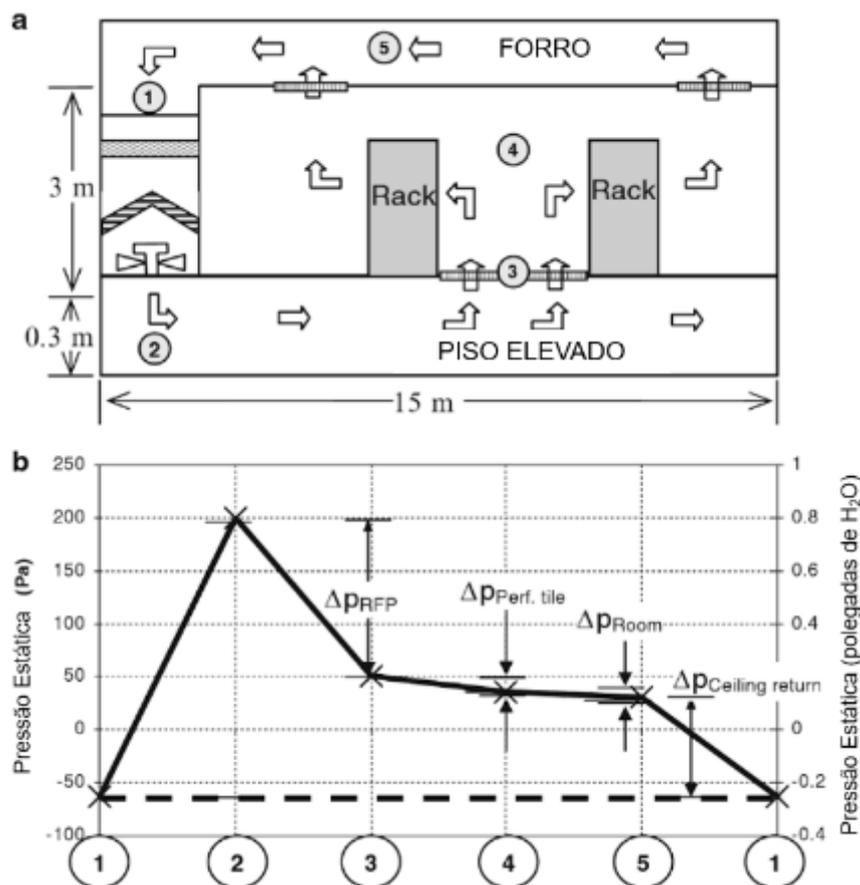


Figura 25 - Balanço típico de pressões na sala de dados.

Fonte: adaptado de Joshi e Kumar (2012, p.46)

As temperaturas ideais para os ativos de TIC mais antigos costumavam ser mais baixas. Segundo Salim (2010), as unidades *CRAC/CRAH* forneciam ar a temperaturas próximas de 15 °C. Desta forma, sistemas economizadores do tipo “*free colling*” só podiam atuar com temperaturas do clima abaixo de 15 °C. Com temperaturas mais altas de suprimento, de até 25 °C, com temperaturas de clima abaixo deste valor já se pode contar com economia de energia para o sistema de VAC. Se a temperatura ambiente do clima não exceder a 25 °C, então 100% do tempo o sistema “*free cooling*” poderá atuar, não sendo necessária a planta de refrigeração.

O comitê técnico (TC 9.9) da ASHRAE trabalhou com a indústria de sistemas e equipamentos de refrigeração e de TIC para definir as faixas de temperatura e umidade relativa do ar, para os ambientes de *data center*, adequados para as novas gerações de equipamentos de TIC. Em 2008

publicaram a recomendação revisada, com as novas faixas. A classe A1 recomenda limites para legado de TIC, como mostra a tabela 7.

Tabela 7 - AHSRAE (TC 9.9) Classe A1 – 2008.

Parâmetro do ar	Recomendação	Permitido
Temperatura mínima	18 °C BS ²¹	15 °C BS
UR mínima	5,5 °C PO ²²	20% UR ²³
UR máxima	60%	80%
Ponto de Orvalho	15 °C PO	17 °C PO
Temperatura máxima	27 °C BS	32,2 °C BS

Fonte: adaptado de Salim (2010, p.89)

As demais classes de equipamentos são como na tabela 8.

Tabela 8 - Ambiente para ativos de TIC (equipamentos ligados).

Classes		Temp. BS [°C]	Faixa de Umidade	Temp. PO [°C]	Altitude Máxima [m]	Máximo Gradiente [°C/h] VER NOTAS
Anterior	Atual					
Recomendado						
1 e 2	A1 a A4	18 a 27	5,5 °C PO a 50% UR e 15 °C PO		n/a	
Admissível						
1	A1	15 a 32	20% a 80% UR	17	3050	5/20
2	A2	10 a 35	20% a 80% UR	21	3050	5/20
n/a	A3	5 a 40	-12 °C PO e 8% UR a 85% UR	24	3050	5/20
n/a	A4	5 a 45	-12 °C PO e 8% UR a 90% UR	24	3050	5/20

Notas:

- Para equipamentos de armazenamento por fitas, não mais que 5 °C/h.
- Para qualquer outro equipamento, não mais que 20 °C/h e 5 °C/h em qualquer período de 15'.
- Os valores de 5 °C/h e 20 °C/h **não** são leituras instantâneas de variação.

Fonte: adaptado de ASHRAE (TC 9.9) (2011, p.23)

²¹ BS: Bulbo Seco.

²² PO: Ponto de Orvalho.

²³ UR: Umidade Relativa.

Pode-se dizer que as classes A1 e A2 são indicadas para equipamentos de TIC menos recentes e as categorias A3 e A4 para novas tecnologias de infraestrutura e TIC.

As referidas classes são representadas como janelas na carta psicrométrica.

Para essas conclusões e definições, a ASHARE pôs em prática uma extensa pesquisa junto a nove (9) dos principais fabricantes de equipamentos de *networking* (aproximadamente 400 modelos), seis (6) dos principais fabricantes de servidores (aproximadamente 300 modelos) e sete (7) dos principais fabricantes de discos de armazenamento de dados (aproximadamente 200 modelos).

A figura 26 apresenta o resultado da pesquisa, comparando as temperaturas máximas e mínimas de cada grupo de equipamentos. As esferas representam em diâmetro a participação (quantidade relativa) e o centro da esfera está posicionado na temperatura máxima.

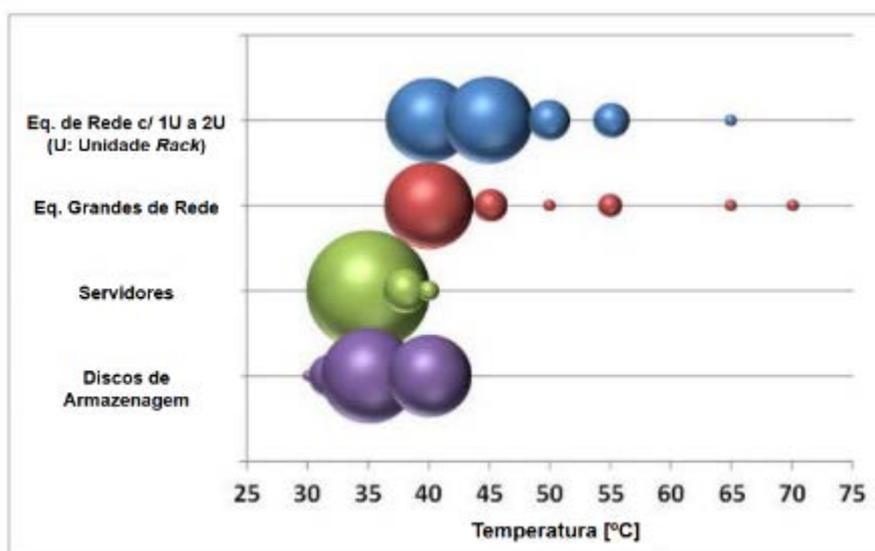


Figura 26 - Temperatura máxima para TIC - Pesquisa ASHRAE (TC 9.9) 2008.

Fonte: adaptado de ASHRAE (TC 9.9) (2013, p.11)

Nota explicativa: “U” ou “UR” significa “Unidade *Rack*” e corresponde a uma altura padrão de subdivisão da altura útil total de um *rack*. Cada “UR” mede 44,45 mm ou 1,75 polegadas (cada polegada mede 25,4 mm).

A figura 27 mostra as janelas ou envelopes de limites ASHRAE, para as classes A1 a A4, sobre uma carta psicrométrica.

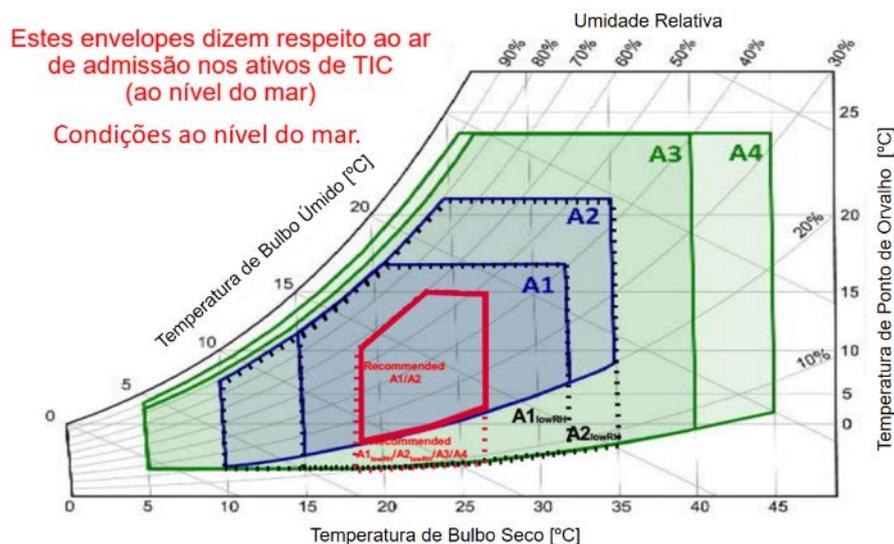


Figura 27 - Carta psicrométrica e janelas ou envelopes ASHRAE (TC 9.9) 2008.

Fonte: adaptado de ASHRAE (TC 9.9) (2011, p.23)

2.15. Soluções para Coordenação de Fluxos de Ar no *Data Center*

Reunindo informações diversas dos autores mencionados e experiências de campo, pode-se qualificar considerações de seleção para as soluções da problemática de coordenação do fluxo de ar no *data center*. Essas considerações passam, por exemplo, por entender as condições do projeto. Isto é, trata-se de um projeto inteiramente novo (“*green field*”²⁴) ou uma adaptação ou reforma de um ambiente existente?

O quadro 6 mostra essas principais considerações, para os principais critérios, não limitando a estes.

²⁴ *Green Field*: construção realizada a partir de um terreno nunca utilizado antes.

Quadro 6 - Critérios e considerações – Coordenação de fluxo de ar - Data center.

Critério	CQ/CF ²⁵	CQE/DEV ²⁶	CFE ²⁷
Conforto	Um corredor é mais quente que o outro.	A maior parte do espaço será mantida poucos °C acima da temperatura de suprimento.	A maior parte do espaço será mantida muitos °C acima da temperatura de suprimento. Pode ser desconfortável para pessoas no ambiente.
Obstruções físicas	Mínimos desafios construtivos, mas a densidade é limitada.	Pode ser complicado resolver interferências mecânicas sobre os racks e no forro falso.	Pode ser instalado rapidamente e sobre o piso elevado e racks existentes, com pouca ou nenhuma modificação.
SDACI	Dependendo das normas locais, um número reduzido de <i>sprinklers</i> pode ser possível.	Dependendo da norma local e do projeto, pode ser necessário instalar dispositivos dentro dos enclausuramentos (sobem até o forro).	Dependendo do código local e do projeto, será necessária a instalação de dispositivos adicionais dentro do conjunto enclausurado.
Iluminação	A iluminação geral da sala é suficiente.	Terá de ser planejada, adicionalmente, para dentro dos enclausuramentos.	Dependendo do material utilizado, luminárias adicionais ser requeridas dentro dos enclausuramentos.
Retorno do ar	Não requer soluções específicas.	Requer dutos verticais sobre os corredores ou racks até o forro e/ou o rebaixamento deste.	Não requer soluções específicas.
CRAC ou CRAH	Compatíveis devido a temperaturas de retorno moderadas.	Para sistemas que operam com CRAC (ED/DX) ²⁸ as altas temperaturas de retorno podem ser limitantes para a solução.	
Economizadores	Compatível.	Permite o acréscimo do número de horas de economizadores (<i>free cooling</i>) devido a temperaturas de retorno mais altas.	
Reação à falha do sistema de AVAC	Corredores frios e quentes rapidamente equalizam em temperatura média ascendente, até os alarmes de temperatura crítica dos equipamentos.	Proporciona massa predominante de ar frio no início da falha. Contribui para superar a recuperação numa interrupção de energia elétrica, se o sistema não contar com <i>continuous cooling</i> ²⁹ .	Proporciona massa predominante de ar quente no início da falha com gradiente menor no final da falha.
Pé-direito	Suficiente para a coordenação com piso elevado e/ou forro falso (<i>plenums</i> de insuflamento e retorno).	Deve ser alto o suficiente para que adequações de forro-falso e piso elevado, além de dutos e separações sejam implementadas.	

²⁵ CQ/CF: Corredores Quentes / Corredores Frios.

²⁶ CQE/DEV: Corredor Quente Enclausurado/Duto de Exaustão Vertical.

²⁷ CFE: Corredor Frio Enclausurado.

²⁸ ED/DX: Sistemas de condicionamento por expansão direta de fluido refrigerante.

²⁹ *Continuous Cooling*: recursos de continuidade para a operação do sistema de AVAC no caso de falta de energia elétrica. Inclui UPS para bombas, CRAC/CRAH válvulas automáticas, rejeição e sistemas de termoacumulação (AG).

2.16. A Ferramenta de Simulação *CFD* Aplicada a *Data Centers*

Para o desenvolvimento que segue, a ferramenta escolhida para análise e confirmação das hipóteses de solução é o *CFD* (*Computational Fluid Dynamics*).

Sendo os modelos economicamente de impossível construção para serem testados em escala real, mesmo para projetos reais de implementação, o *CFD* apresenta-se como ferramenta de valor inestimável, associada a equipamentos de computação com capacidade e velocidade para o processamento requerido durante a modelagem e simulações.

Neste projeto o *CFD* foi utilizado, por repetidas vezes, para a compreensão e análise dos efeitos de cada passo de mudança nos arranjos de layout da sala de dados modelo, assim como o reposicionamento de cada *rack* e cada placa perfurada de piso elevado, ainda com a verificação do correto posicionamento de painéis elétricos e dos *CRAC/CRAH*.

As soluções empregadas são resultado das melhores práticas e recomendações da tecnologia atual e são sugeridas para implementação no mercado atual.

O propósito das soluções do *CFD* neste trabalho é o de confirmar e balizar os passos e, com isso, validar os resultados obtidos.

A figura 28 apresenta a saída de *CFD* para uma sala de dados real com situações de fluxo de um ambiente em operação.

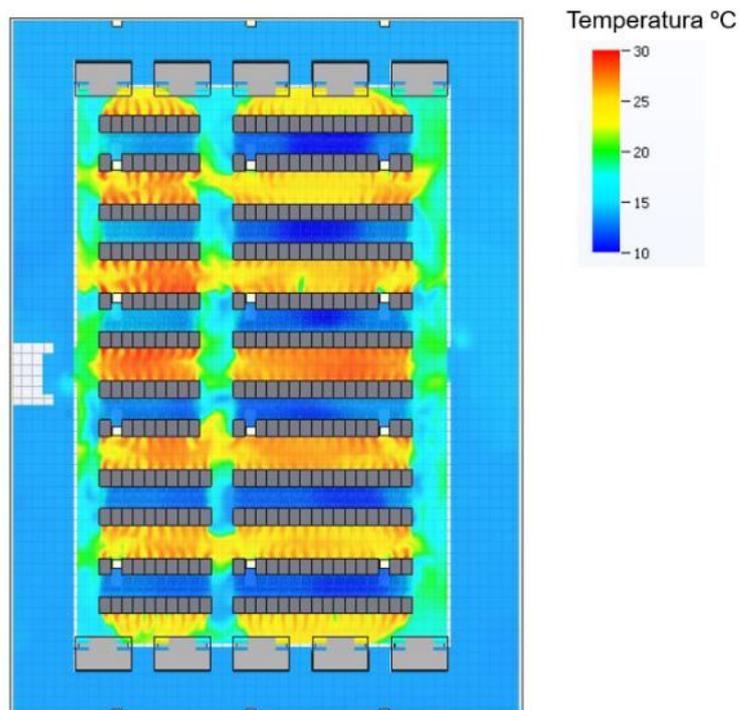


Figura 28 - Modelo típico de CFD para *data center*.

Segundo Marshall e Bemis (2011), independentemente do tipo de problema, o processamento de ferramentas de *CFD* acontece geralmente segundo um mesmo processo matemático. Equações de conservação como, continuidade, momento (Navier-Stokes), turbulência e energia são resolvidas em pequenas células que preenchem o volume da simulação.

Uma simulação em *CFD* começa com a criação da geometria do problema. A região a ser modelada é, frequentemente, chamada de domínio computacional e a geometria consiste dos limites do domínio e todos objetos ali contidos.

Uma vez que a geometria da sala e do conteúdo foram criados, o volume precisa ser quebrado em um grande número de pequenas células onde cálculos serão desenvolvidos os resultados armazenados. O conjunto de linhas e planos que separam essas células é geralmente denominado malha ou grade e são apresentados na figura 29.

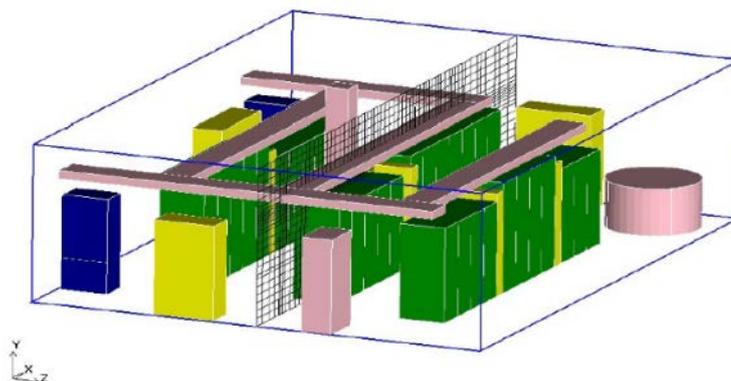


Figura 29 - CFD - Geometria do volume e malha ou grade.

Fonte: Marshall e Bemis (2011, p.1)

Algoritmos automáticos de montagem da grade contém instruções para permitir ajustes diferentes de uma construção de formato cartesiano, baseados na imposição de uma geometria específica. A figura 30 mostra as adaptações da grade à geometria do ambiente.

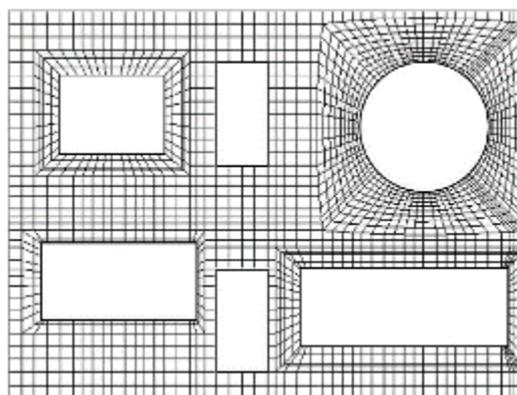


Figura 30 - CFD - Ajustes da grade função da geometria.

Fonte: Marshall e Bemis (2011, p.3)

O volume, portanto, precisa ser dividido em um grande número de células e as equações são resolvidas para cada uma.

Cada célula do domínio tem um ponto central. A tarefa do computador (*solver*) do *CFD* é obter a solução para todas as equações em cada ponto. Não é raro um modelo alcançar mais de 100.000 células que passam por 5 equações de conservação e até mais de 300 iterações para alcançar valores de convergência aceitáveis. Isto pode representar mais de 150.000.000 de equações resolvidas em uma simulação.

A figura 31 representa os resultados das iterações para a convergência de valores.

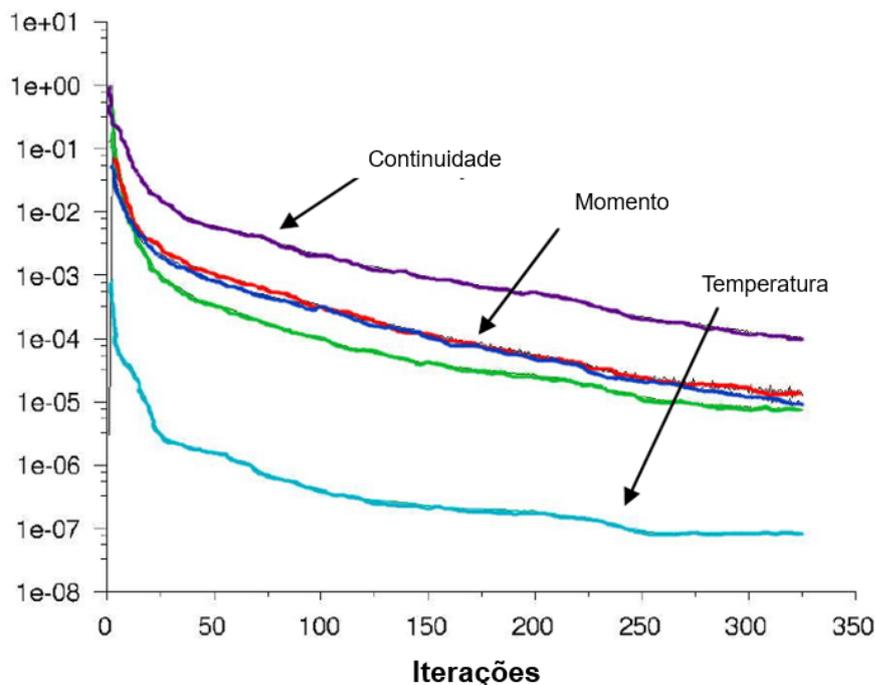


Figura 31 - CFD - Resultado convergente do computador.

Fonte: adaptado de Marshall e Bemis (2011, p.6)

Concluída a fase de cálculos, com a convergência dos resultados (minimizadas as diferenças entre as iterações até um valor aceitável), os resultados devem ser apresentados. Não é viável analisar-se uma lista de 100.000 pontos (exemplo). Portanto, os códigos adequadamente planejados constroem imagens em planos superfícies, linhas e cores que permitem uma análise rápida, por um avaliador treinado, levando a observações eficazes e conclusivas para ações a tomar.

Ferramentas de *CFD*, dependendo do modelo em processo, apresentam os resultados com imagens e recursos de detalhamento, específicos para cada campo da aplicação da engenharia de fluidos. No caso de *data centers*, o aspecto geral típico de uma saída de resultados de *CFD* pode ser visto na figura 32 e nas demais imagens específicas do desenvolvimento deste trabalho.

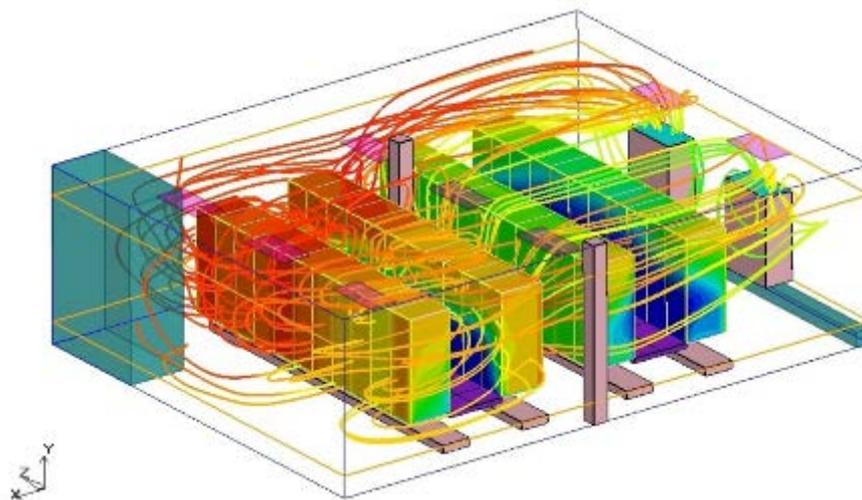


Figura 32 - CFD - Apresentação típica de resultados.

Fonte: Marshall e Bemis (2011, p.7)

3. DESENVOLVIMENTO

Sendo o sistema de AVAC o segundo grande consumidor de energia do *data center* e sendo o circuito de ar de refrigeração que circula entre a fonte de calor (o ativo de TIC) e o condicionador de ar (o *CRAC/CRAH*) o trecho mais suscetível às condições que impõem ineficiências, principalmente por má gestão de soluções (projeto, operação e manutenção), foram reunidas para estas condições as principais soluções de separação e coordenação de fluxo disponíveis.

Elaborou-se um modelo de *data center* e para este estudo, com uma dada uma capacidade de espaço e de refrigeração.

Foram simulados em *CFD* cada passo de mitigação das ineficiências.

Dessa forma foi possível obter-se uma progressão de resultados que demonstraram a efetividade das soluções e que servem como orientação para a correta gestão desta infraestrutura de *data center*.

O objetivo é demonstrar os efeitos dos diferentes arranjos para a coordenação do fluxo de ar entre ativos de TIC e condicionadores de ar.

A fonte de carga térmica para o ambiente são os *racks* com seus ativos de TIC e os respectivos componentes internos sendo eles mecânicos, elétricos, eletrônicos e fotônicos, sendo geradores de calor, praticamente na totalidade por efeito Joule, com muito pouco ou nada de trabalho mecânico resultante.

Para este estudo, a carga térmica imposta pelo envelope (insolação e cargas externas à sala) foi desprezada.

3.1. Definindo os Componentes do Sistema

Para o desenvolvimento deste experimento, um modelo do ambiente *data center* foi construído em *software* de *CFD*, com as seguintes características:

3.1.1. Arquitetura:

- a) Sala em piso térreo e único nível;
- b) Dimensões da sala:
 - i. Largura: 9 m;

- ii. Comprimento: 10,8 m;
 - iii. Área: 97,2 m²;
 - iv. Pé-direito até o forro: 4,0 m;
 - v. Pé-direito até a laje: 4,6 m;
 - vi. Altura do entreforro (plenum de retorno - só para CQE³⁰): 0,6 m;
 - vii. Altura do piso-elevado (caixa plenum de insuflamento): 0,6 m.
- c) Paredes: divisórias em *drywall* (não relevante para o modelo);
- d) Laje de piso: concreto liso e impermeável;
- e) Laje de teto: concreto liso e impermeável;
- f) Forro-falso:
- i. Placas quadradas (0,6 x 0,6) m x 0,025 m de espessura;
 - ii. Material isolante térmico não combustível;
 - iii. Vazamento: 5%.
- g) Piso elevado:
- i. Placas quadradas (0,6 x 0,6) m x 0,05 m de espessura, cegas;
 - ii. Placas, nas mesmas dimensões, perfuradas: 8%, 25% e 56%;
 - iii. Vazamento: 5%.
- h) Não existem aberturas ou vazamentos permanentes;
- i) Capacidade da sala:
- i. Até 40 *racks* de (600 C x 1050 L x 2000 A) mm;
 - ii. Até 4 *CRAH*;
 - iii. Até 4 *PDU*.

3.1.2. Condicionadores de Ar:

- a) *CRAH*:
- i. Quantidade: 4 (N=3; R=1);
 - ii. Tipo: *Down flow, ECF (Electronically Commuted Fan)*;
 - iii. Características Unitárias:
 - Vazão:

³⁰ CQE: Corredor Quente Enclausurado

- 17.100 CFM (@100%)³¹, 15.390 CFM (@90%)³²
ou 29.053 m³/h (@100%), 26.148 m³/h (@90%).
- Ts: 20°C @ 50%UR:
 - Calor Total: 136,8 kW;
 - Calor Sensível: 123,1 kW;
 - Calor Latente: 13,7 kW.
- iv. Capacidade Total (Calor Sensível):
 - Vazão: 46.170 CFM ou 78.444 m³/h;
 - Troca: 369,4 kW.
- b) Razão de transporte fixada em: 125 CFM/kW.

3.1.3. Carga Térmica (*Racks* com ativos de TIC – Calor Sensível):

- a) Por *rack*: 0 a 10 kW (máximo);
- b) Densidade planejada por *rack*: 6 kW;
- c) Densidade da sala: 2,47 kW/m²;
- d) Carga máxima planejada da sala: 240 kW.

3.1.4. Soluções de Coordenação de Fluxo do Ar:

- a) Organização de *racks* em filas;
- b) Organização de corredores frios e quentes;
- c) Organização da distribuição de cargas (elétricas / térmicas);
- d) Fechamento de aberturas nas filas;
- e) Implementação de corredores enclausurados:
 - i. CFE: Corredor frio enclausurado;
 - ii. CQE: Corredor quente enclausurado.

Neste modelo não foi utilizada a solução de *rack* enclausurado. É uma solução eficaz, mas de uso restrito. Não se adapta ao modelo escolhido.

³¹ A 100% da capacidade do equipamento.

³² A 90% da capacidade do equipamento, conforme recomendação do Uptime Institute para Tier III.

A figura 33 apresenta o modelo de geometria ou arquitetura idealizada para utilização neste trabalho.

A figura 34 mostra a mesma configuração em planta, onde é possível visualizar um arranjo coordenado de *racks* em corredores, com as cargas em quilowatt [kW] indicadas em cada *rack*, a orientação destes *racks* com a face frontal destacada pela linha escura, os painéis elétricos (em verde) e os equipamentos de condicionamento do ar (em azul). Nos *CRAH* são mostradas as vazões volumétricas (em CFM) e também a temperatura de insuflamento (suprimento) do ar refrigerado.

3.2. Modelo de Arquitetura (Layout) da Sala Data Center.

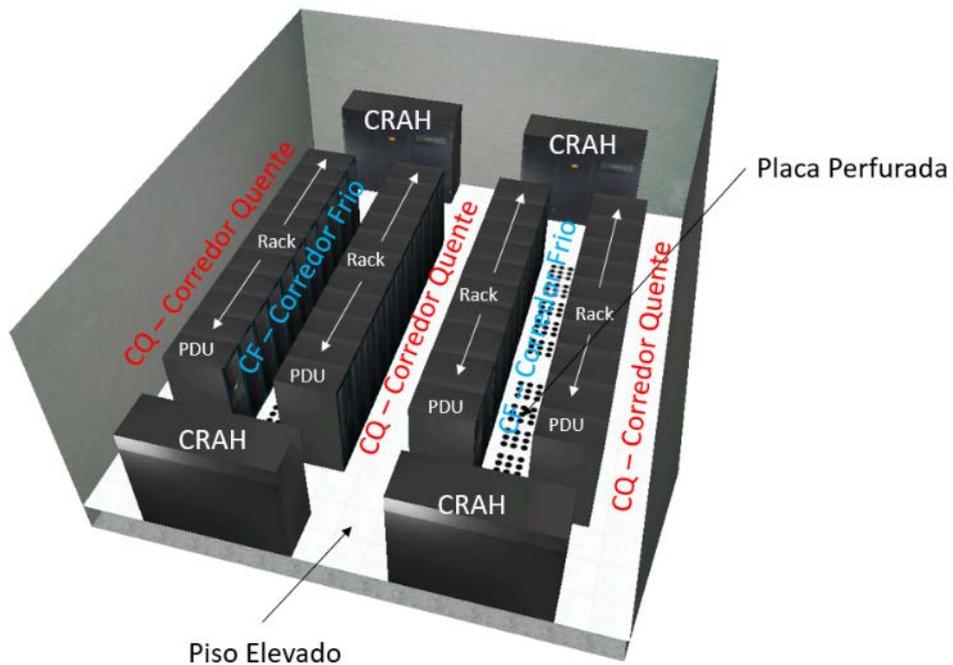


Figura 33 - Modelo de arquitetura - Arranjo corredores quentes e frios.

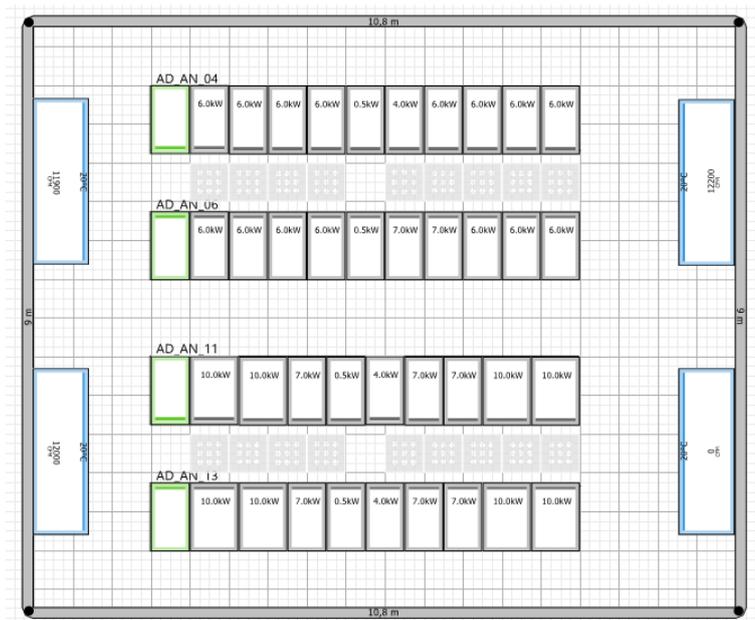


Figura 34 - Modelo com corredores quentes e frios – Planta.

A figura 35 e a figura 36 mostram o mesmo modelo, agora com corredores frios enclausurados. Trata-se do fechamento do espaço do corredor onde o ar frio é suprido ao ambiente através das placas perfuradas do piso elevado.

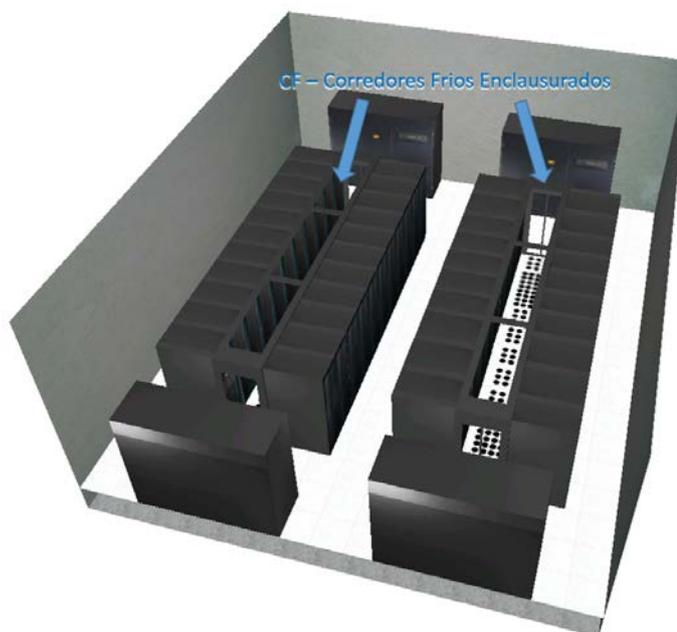


Figura 35 - Modelo de arquitetura - Arranjo corredores frios enclausurados.

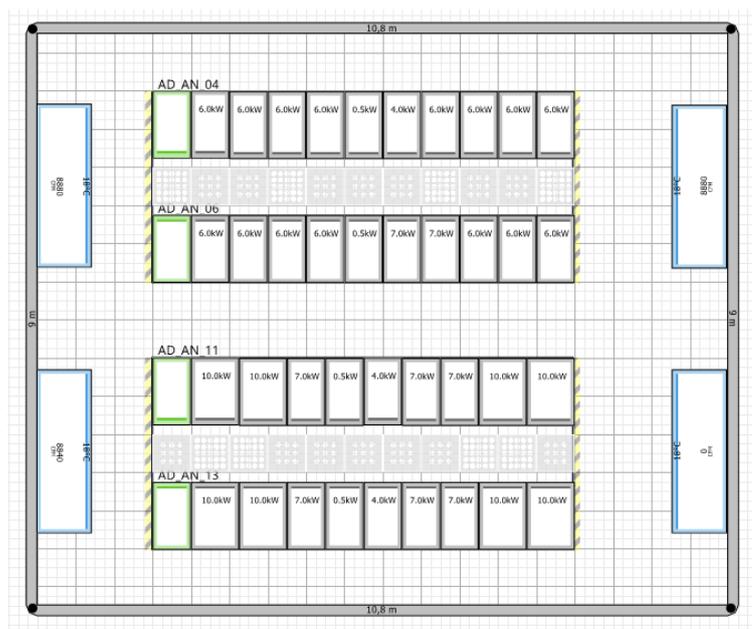


Figura 36 - Modelo com corredores frios enclausurados – Planta.

A figura 37 e a figura 38 mostram o mesmo modelo, agora com corredores quentes enclausurados. Trata-se do fechamento do espaço do corredor onde o ar quente é descarregado no ambiente através face traseira dos ativos de TIC ou do *rack*.

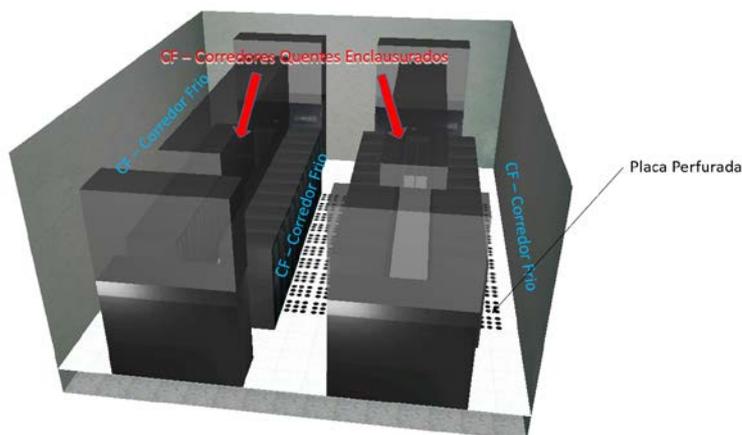


Figura 37 - Modelo de arquitetura - Arranjo corredores quentes enclausurados.

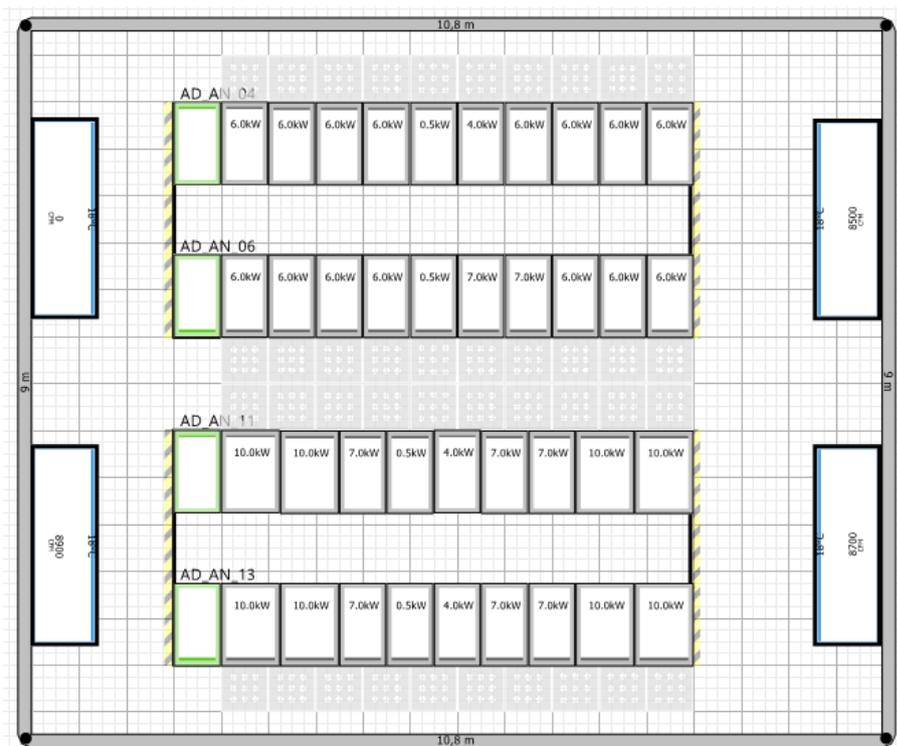


Figura 38 - Modelo com corredores quentes enclausurados – Planta.

3.3. Planejamento do Trabalho e Roteiro de Simulações

Inicialmente um roteiro foi planejado para a implementação de soluções de coordenação de fluxo de ar num ambiente modelo, implementando progressivamente cada proposição de solução e, em cada situação, simulando por *CFD* o resultado da solução implementada quanto à adequada refrigeração de cada *rack* e seu conteúdo (o *payload*, que são os equipamentos de informática e telecomunicações instalados nos *racks* (gabinetes)).

A etapa seguinte foi considerar as condições prejudicadas de utilização, frequentemente encontradas em campo, reunidas, isto é, nas quais não se observam as melhores práticas de coordenação do fluxo de ar de refrigeração, como já discutido anteriormente neste trabalho.

Foram registradas, a cada passo, a proposição de solução e as condições de desempenho do sistema de ar condicionado, resultantes das simulações por *CFD* (*Computational Fluid Dynamics*).

Num quadro final, na tabela 9, foram apresentados os resultados, para uma análise agrupada.

Nas páginas seguintes são apresentadas, em cada uma, oito (8) grupos de informação por página, como indicado no quadro 7.

Quadro 7 - CFD Grupos de informação em cada simulação.

Grupo	Descrição
I	Definição da condição e proposta de solução.
II	Geometria do modelo em planta e índices de captação ³³ .
III	Diagrama de vetores velocidade e pressão estática sob o piso elevado.
IV	Desenho em 3D do plano horizontal (Z) posicionado na cota avaliada como crítica para as temperaturas verificadas (máximas de entrada).
V	Desenho em 3D do plano vertical (Y) posicionado no afastamento avaliado como crítico para as temperaturas verificadas.
VI	Desenho em 3D do plano vertical (X) posicionado na abscissa avaliada como crítica para as temperaturas verificadas.
VII	Vetores direção em cota que caracteriza o fluxo para a geometria.
VIII	Planejamento da proposição de solução para o passo seguinte.

³³ Percentual da demanda atendida de ar condicionado, para o *rack* avaliado.

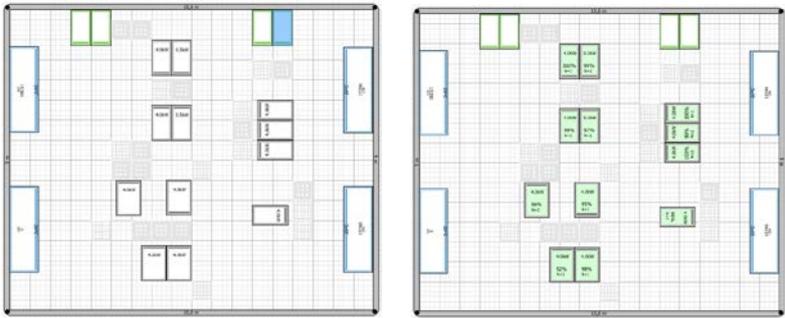
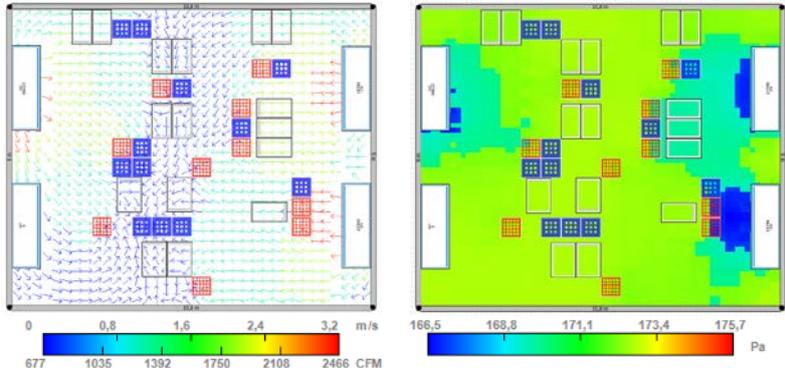
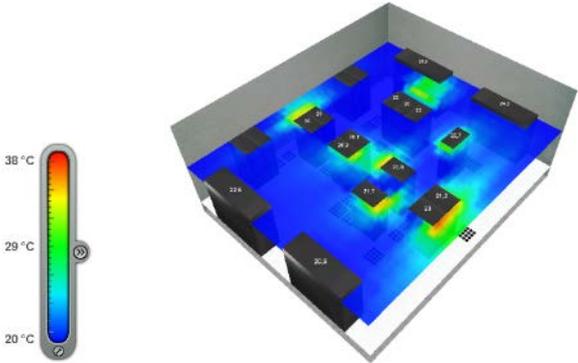
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO - SIMULAÇÕES EM CFD

A tabela 15 resume as simulações os seus respectivos passos de implementação de soluções de investigação e melhoria ao longo do processo.

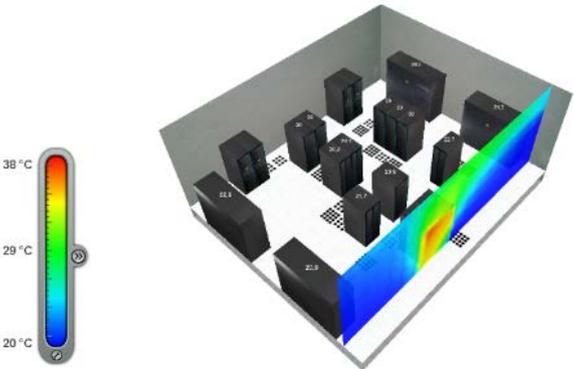
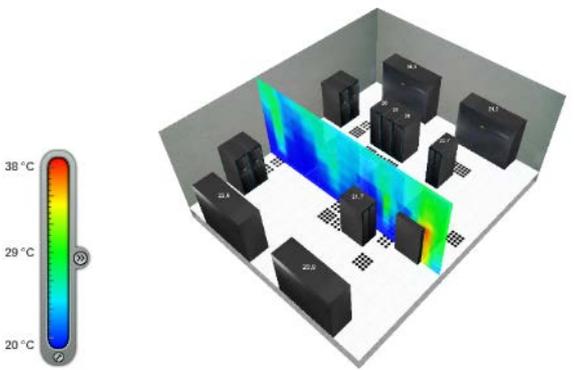
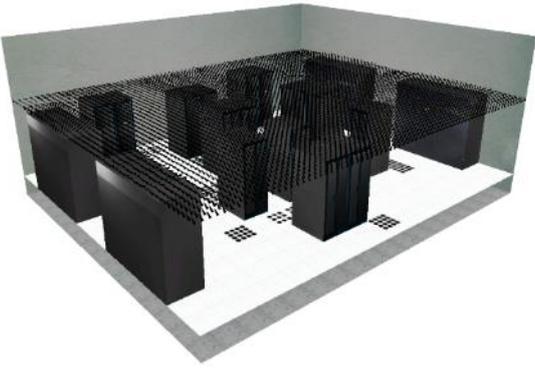
Quadro 8 - CFD Resumo das simulações.

Simulação	Descrição	Carga [kW]	Utilização CRAH
A	Geometria Inicial	41,0	100
B	Expansão - Ativação de carga sem sucesso	43,5	100
C	Expansão - Painéis e racks em filas	61,0	100
D	Tentativa - Ativação de carga sem sucesso	176,5	100
E	Adequação - Giro de racks para CQ/CF	176,5	100
F	Tentativa - Teste de falha CRAH	176,5	100
G	Adequação - No limite dos CRAH	176,0	100
H	Expansão - Organização de placas perfuradas	240,0	89
I	Adequação - Redistribuição de cargas	240,0	81
J	Adequação - Balanceamento de vazões x cargas	240,0	78
K	Adequação - Enclausuramento corredor 11_13	240,0	70
L	Adequação - Enclausuramento corredor 04-06	240,0	61
M	Adequação - Mudança de CFE para CQE	240,0	57
N	Expansão - Limite de capacidade	396,4	100

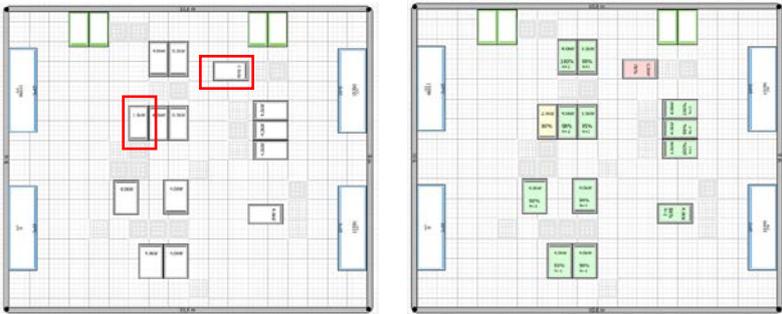
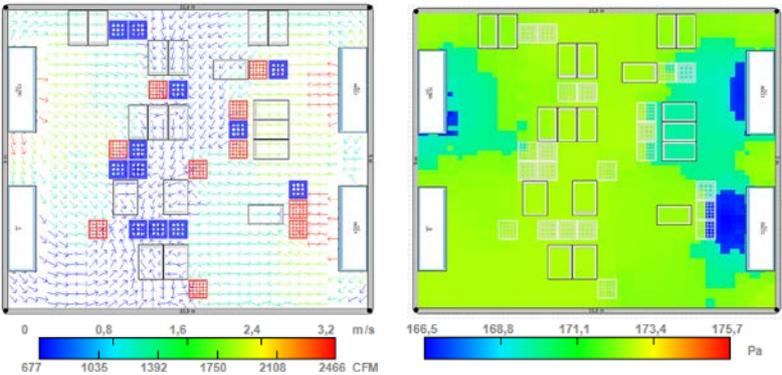
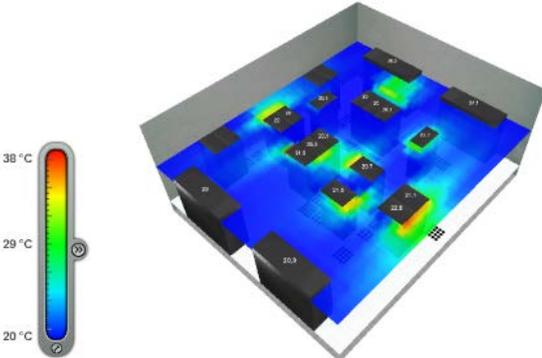
Quadro 9 - Simulação A.

Simulação A	Geometria Inicial – Carga: 41 kW
Grupo de Informação	Descrição
I	<p>Condição regularmente encontrada em ambientes pequenos e médios. Usuário alega não lograr adicionar carga. <i>Racks</i> em posições aleatórias, pela conveniência por cabos, grupos de equipamentos ou outros motivos diferentes das melhores práticas de VAC. Placas perfuradas de piso elevado distribuídas sem critério ou abandonadas. Nenhum equilíbrio entre carga térmica e oferta de vazão. Nenhuma organização aparente. Avaliação.</p>
II	
III	
IV	

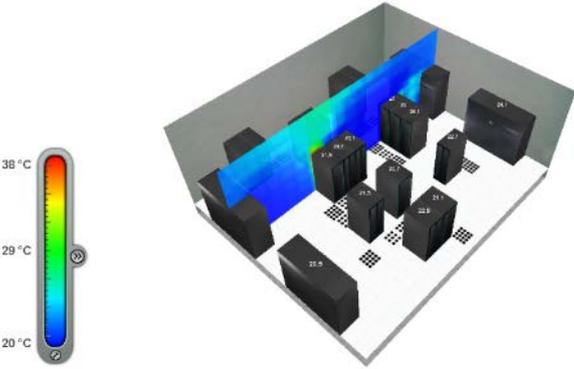
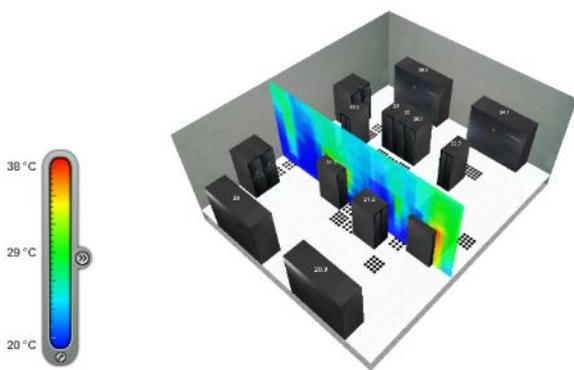
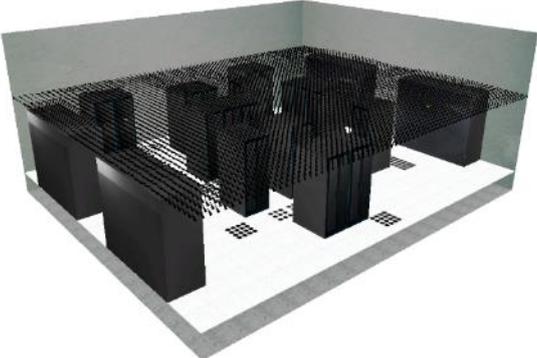
Quadro 10 - Simulação A (continuação).

Simulação A	Geometria Inicial (Continuação)
Grupo de Informação	Descrição
V	
VI	
VII	
VIII	<p>Retorno de <i>CFD</i>, de temperaturas, na cota 1,98 m, mostra “<i>hot spot</i>” em topo de <i>rack</i>. Outros planos localizam. Ambiente em operação com <i>CRAH</i> em vazão máxima e carga não pode ser acrescida, segundo o operador do ambiente. Simular acréscimo de carga.</p>

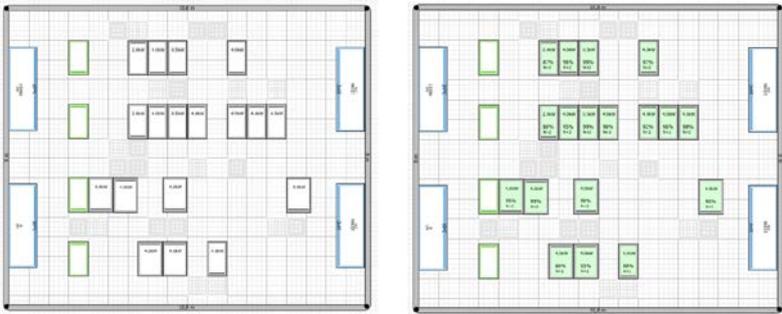
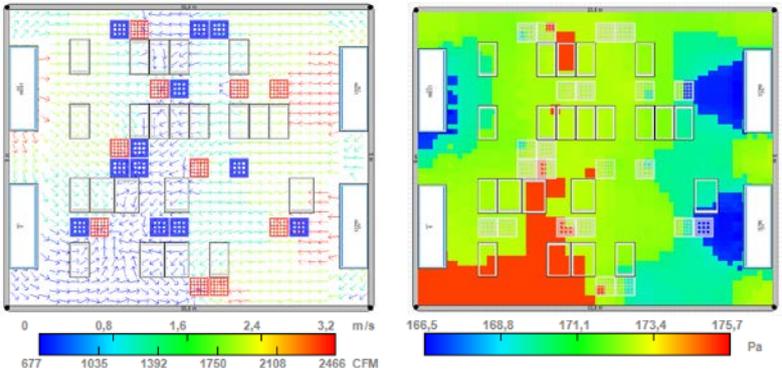
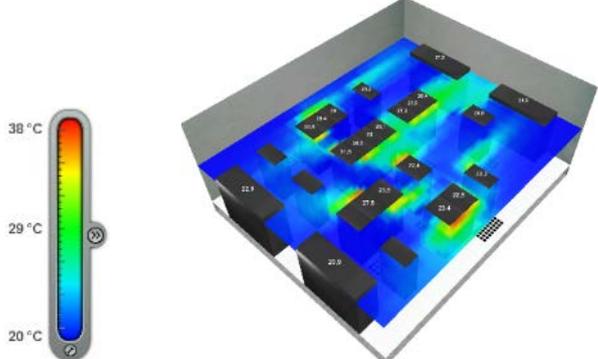
Quadro 11 - Simulação B.

Simulação B	Expansão – Carga: 43,5 kW – Ativação sem sucesso
Grupo de Informação	Descrição
I	Tentativa de adicionar 2 <i>racks</i> c/ carga de 2,5 kW totais, sem sucesso.
II	
III	
IV	

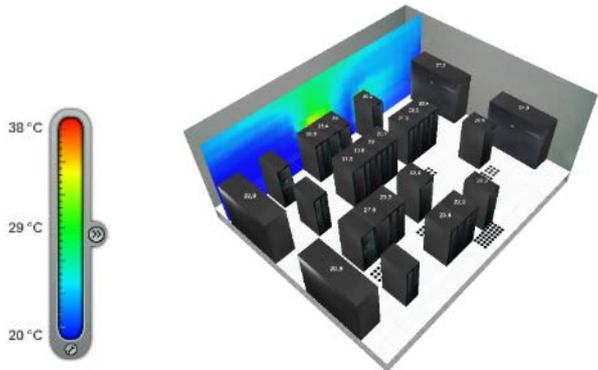
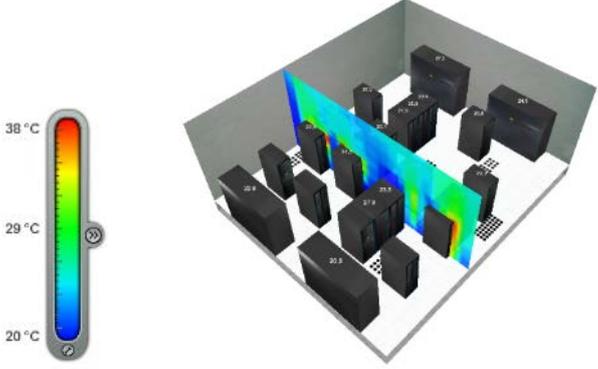
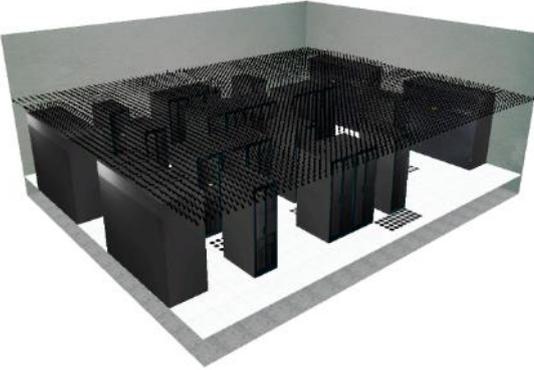
Quadro 12 - Simulação B (Continuação).

Simulação B	Expansão – Carga: 43,5 kW – Ativação sem sucesso (Continuação)
Grupo de Informação	Descrição
V	
VI	
VII	
VIII	<p>A tentativa de acréscimo de carga resultou insuficiência de captação (II). Reorganizar layout segundo um plano de melhorias.</p>

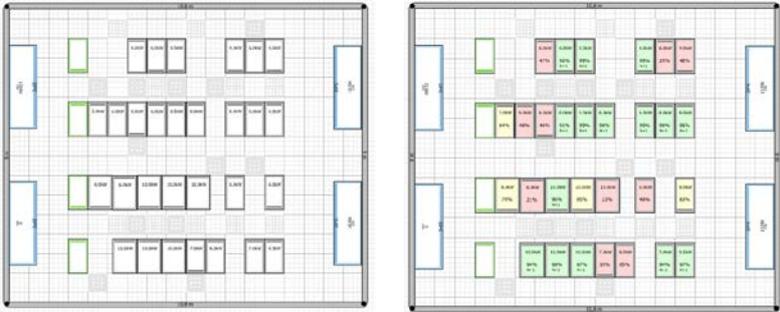
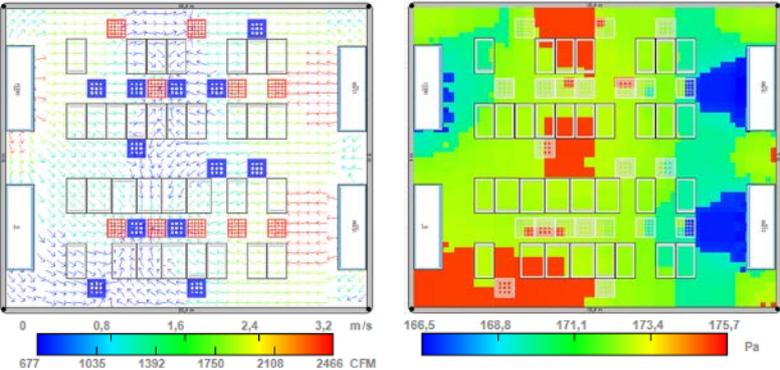
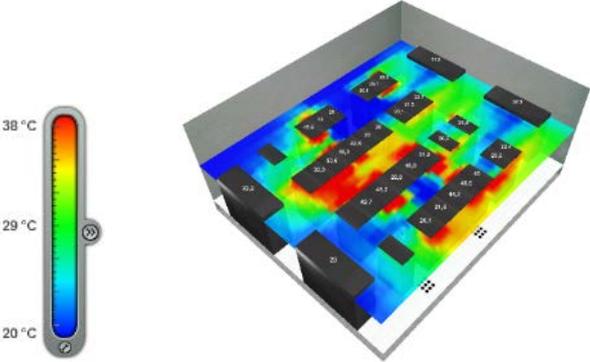
Quadro 13 - Simulação C.

Simulação C	Expansão – Carga: 61 kW – Painéis e racks em filas
Grupo de Informação	Descrição
I	<p>Painéis <i>RPP</i> reposicionados para filas organizadas (CF/CQ) e <i>racks</i> alinhados para as filas. Com isto, a potência pôde ser elevada para até a capacidade dos <i>CRAH</i>.</p>
II	
III	
IV	

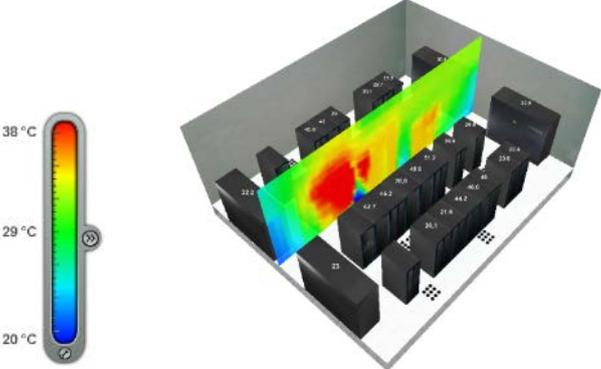
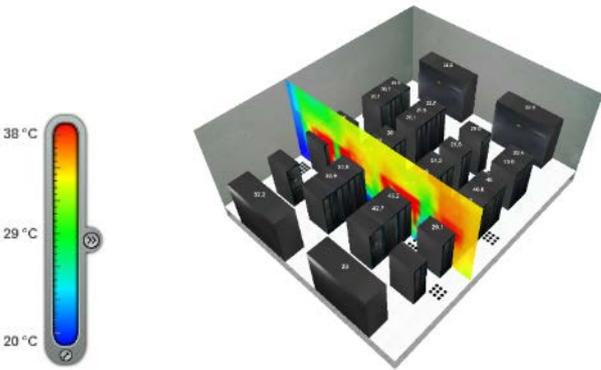
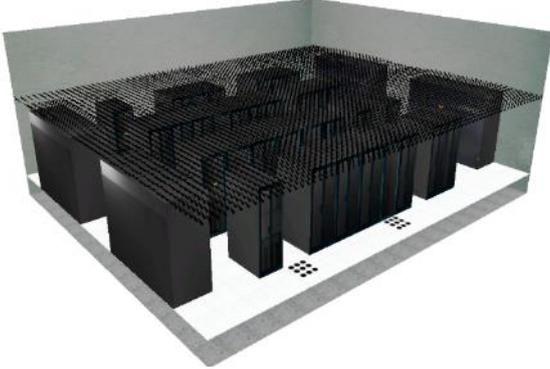
Quadro 14 - Simulação C (Continuação).

Simulação C	Expansão – Carga: 61 kW – Painéis e racks em filas (Continuação)
Grupo de Informação	Descrição
V	
VI	
VII	
VIII	<p>Sucesso com o novo arranjo parcial. Não existe indicação de insuficiência de captação e <i>hot spots</i> graves. Entretanto, verifica-se gradiente intenso de pressão e o arranjo ainda é pobre, assim como o aproveitamento da capacidade dos <i>CRAH</i>. Prosseguir com o plano de melhorias da geometria.</p>

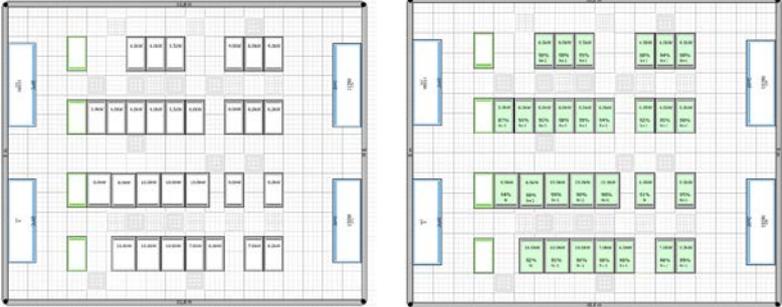
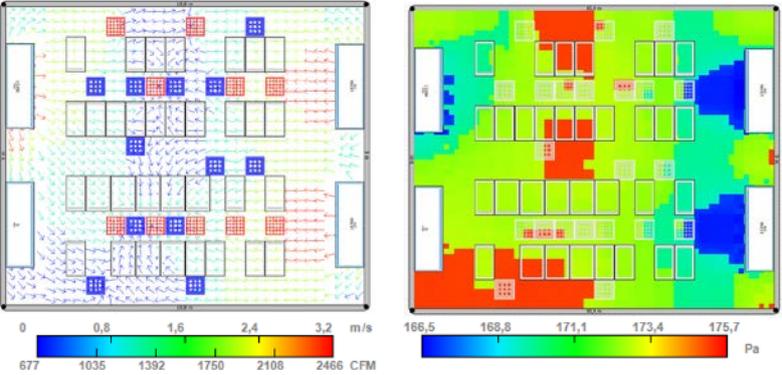
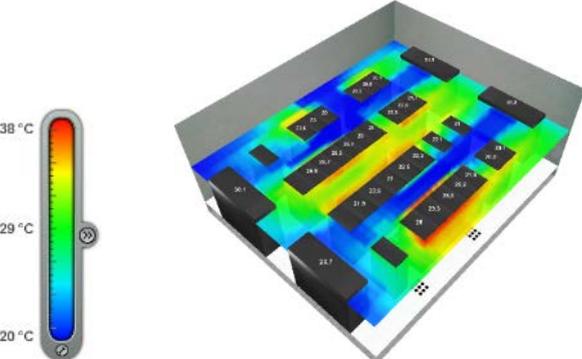
Quadro 15 - Simulação D.

Simulação D	Tentativa – Carga: 176,5 kW – Ativação sem sucesso
Grupo de Informação	Descrição
I	Tentativa de instalar 11 <i>racks</i> com carga adicional de 115,5 kW totais, sem sucesso.
II	
III	
IV	

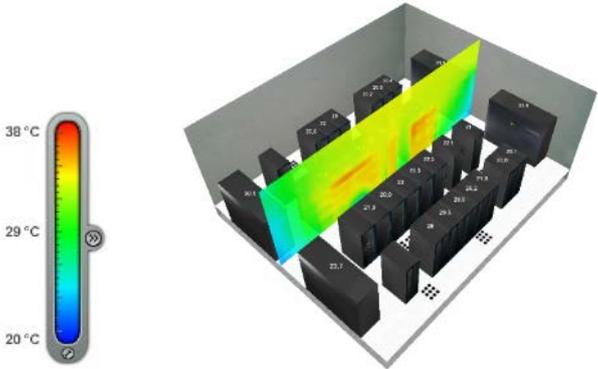
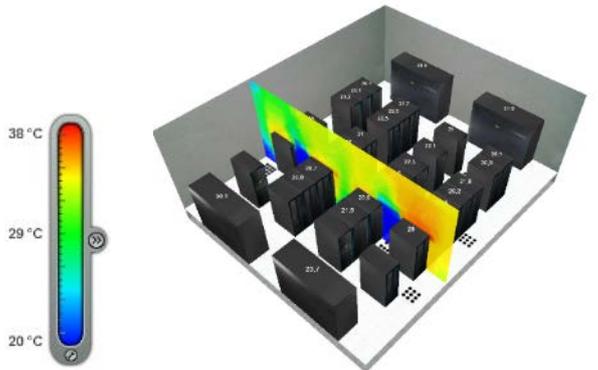
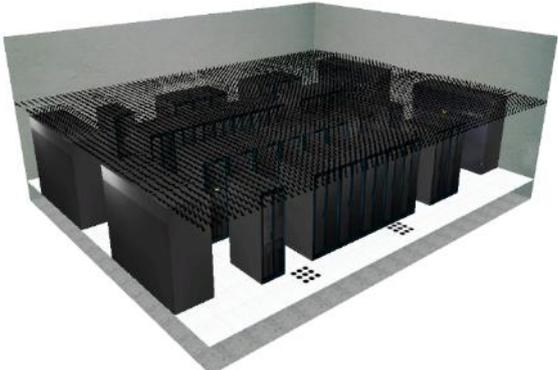
Quadro 16 - Simulação D (Continuação).

Simulação D	Tentativa – Carga: 176,5 kW – Ativação sem sucesso (Contin.)
Grupo de Informação	Descrição
V	
VI	
VII	
VIII	<p>Verifica-se insuficiência de captação (II) e intensos <i>hot spots</i> (V) e (VII). <i>Racks</i> com descarga desordenada (para qualquer corredor) provocam pontos quentes em todos os corredores, fazendo com que ocorra a recirculação.</p> <p>Redefinir arranjo e coordenação de fluxos.</p>

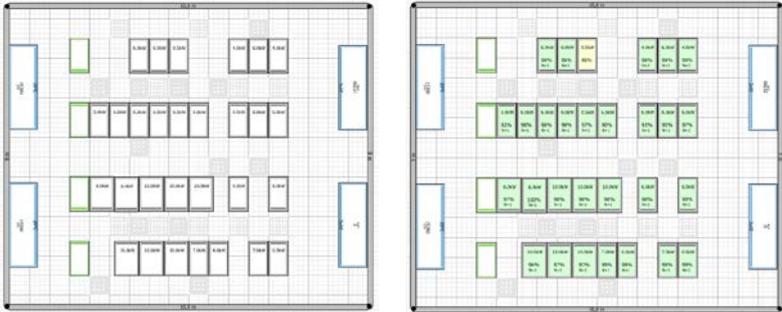
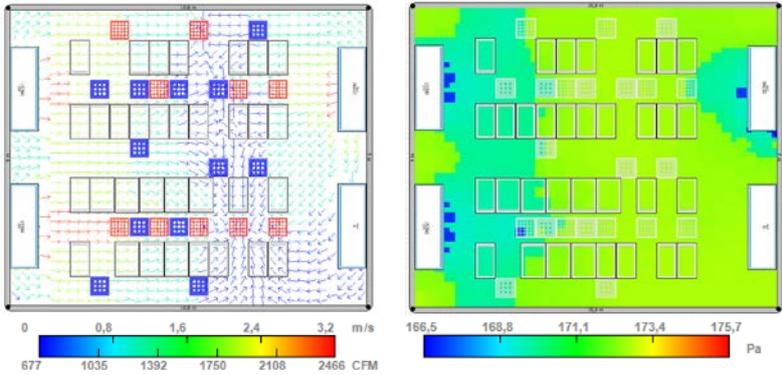
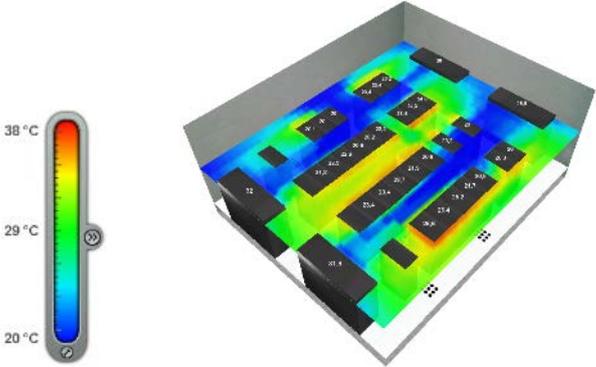
Quadro 17 - Simulação E.

Simulação E	Adequação – Carga: 176,5 kW – Giro de racks para CQ/CF
Grupo de Informação	Descrição
I	<p>Giro de racks invertidos para obter CQ/CF viabiliza a implementação, na capacidade dos CRAH.</p>
II	
III	
IV	

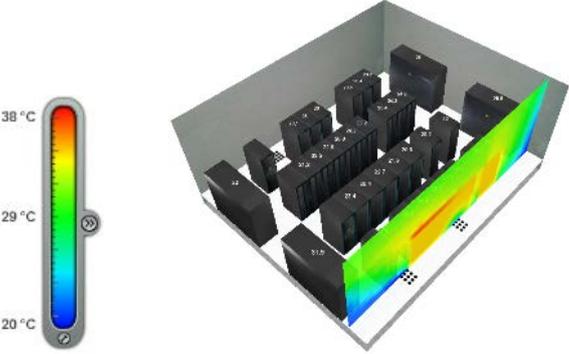
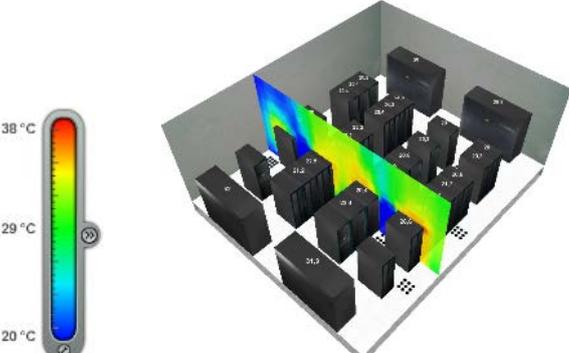
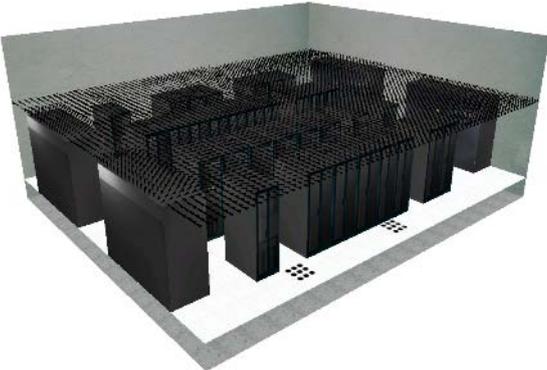
Quadro 18 - Simulação E (Continuação).

Simulação E	Adequação – Carga: 176,5 kW – Giro de racks p/ CQ/CF (Contin.)
Grupo de Informação	Descrição
V	
VI	
VII	
VIII	<p>Captação suficiente (II), entretanto bolsões de baixa pressão mostram a condição limitrofe do arranjo (III). <i>Hot spots</i> moderados (V) e (VII). Devido ao equilíbrio limitrofe cabe simulação de falha, alternando redundância.</p>

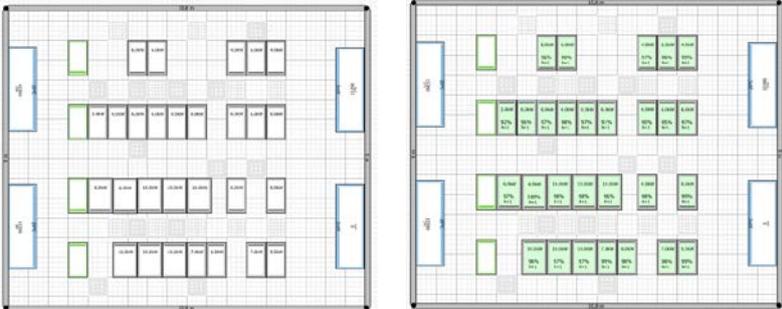
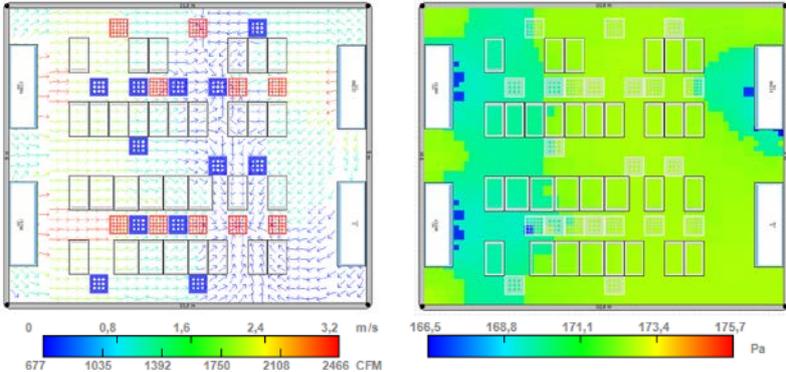
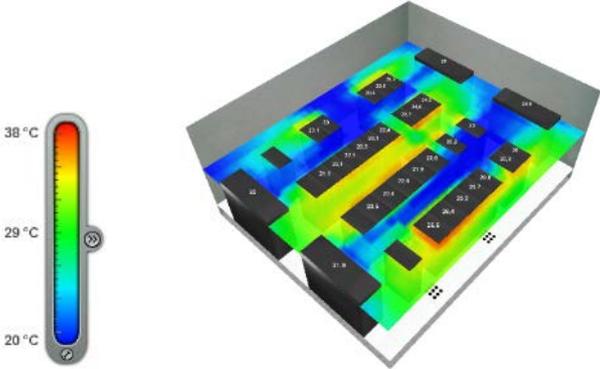
Quadro 19 - Simulação F.

Simulação F	Tentativa – Carga: 176,5 kW – Teste de falha <i>CRAH</i>
Grupo de Informação	Descrição
I	Teste de falha do <i>CRAH</i> #04 aponta a necessidade de limitar carga.
II	
III	
IV	

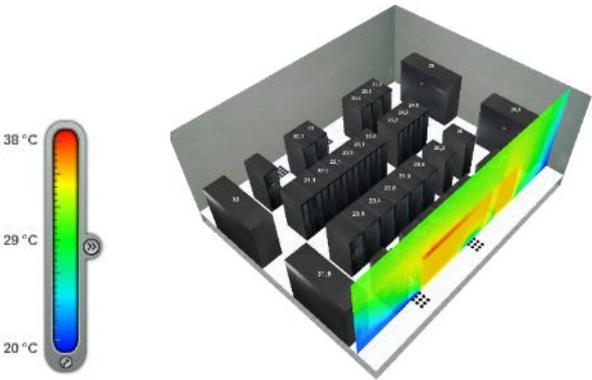
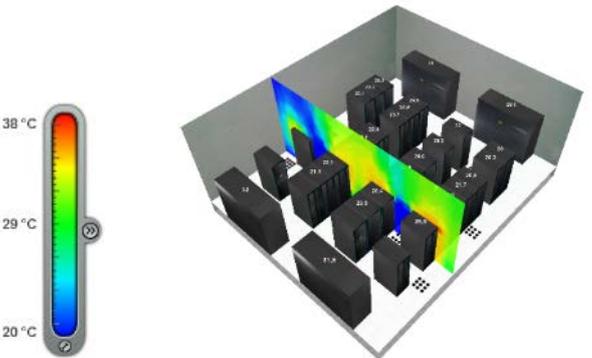
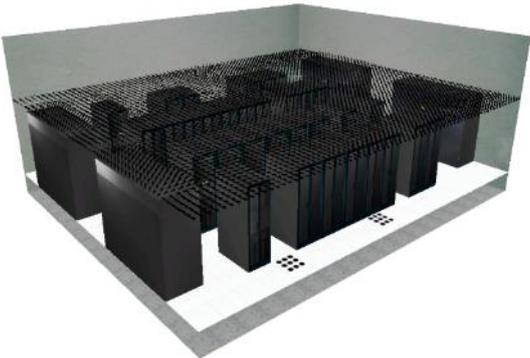
Quadro 20 - Simulação F (Continuação).

Simulação F	Tentativa – Carga: 176,5 kW – Teste de falha CRAH (Continuação)
Grupo de Informação	Descrição
V	
VI	
VII	
VIII	<p>Evidenciada a insuficiência da captação para um rack (II). A proposição é ajustar a carga para a capacidade dos CRAH.</p>

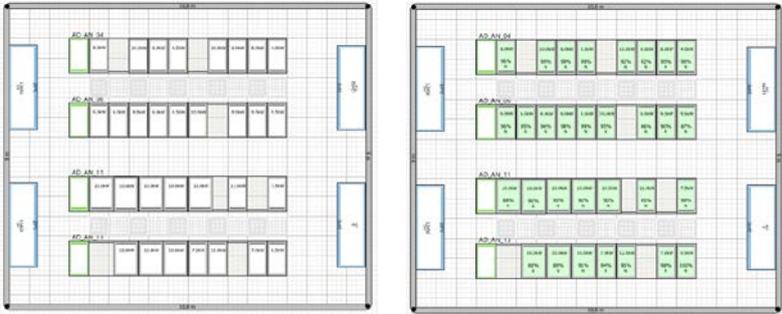
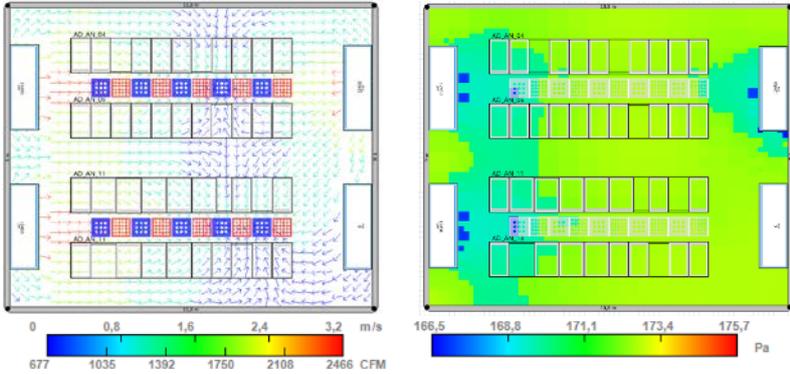
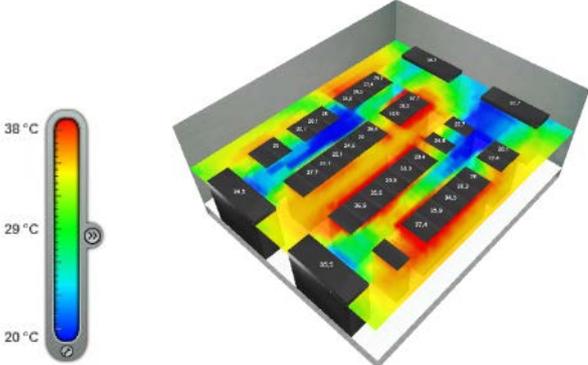
Quadro 21 - Simulação G.

Simulação G	Adequação – Carga: 176 kW – No limite dos <i>CRAH</i>
Grupo de Informação	Descrição
I	Ajuste da carga para a capacidade dos <i>CRAH</i> .
II	
III	
IV	

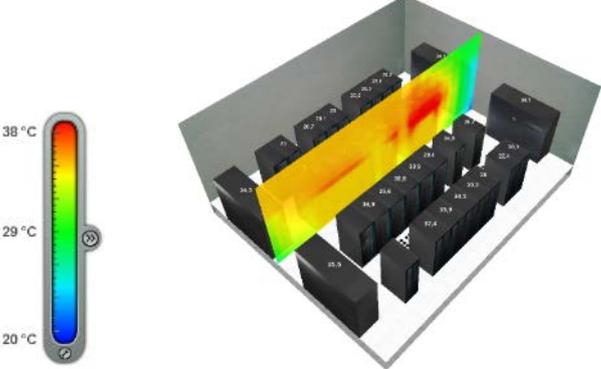
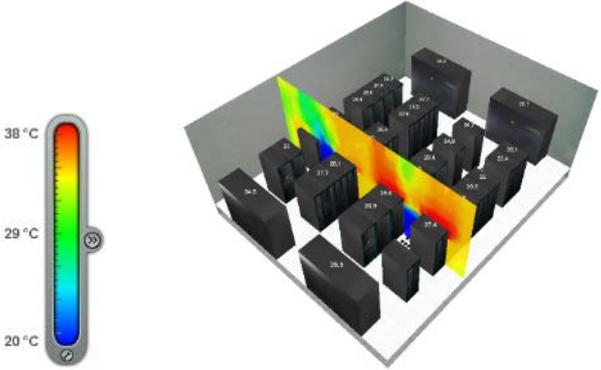
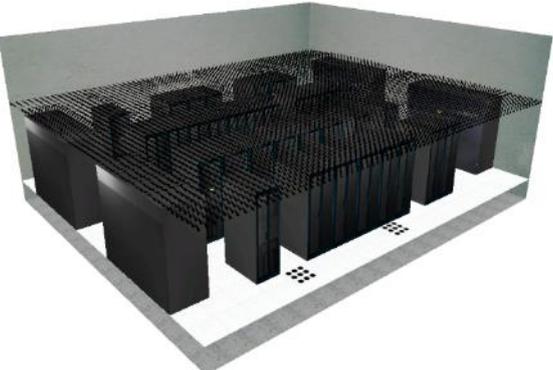
Quadro 22 - Simulação G (Continuação).

Simulação G	Geometria Inicial – No limite dos CRAH (Continuação)
Grupo de Informação	Descrição
V	
VI	
VII	
VIII	<p>Carga posicionada em situação prejudicada para captação (II) removida e total reduzido para compatibilidade. Segundo as melhores práticas os fenômenos como <i>bypass</i> devem ser evitados. Prosseguir com o plano de melhorias.</p>

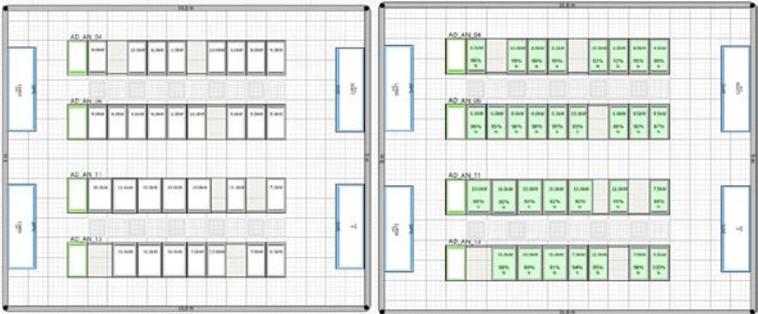
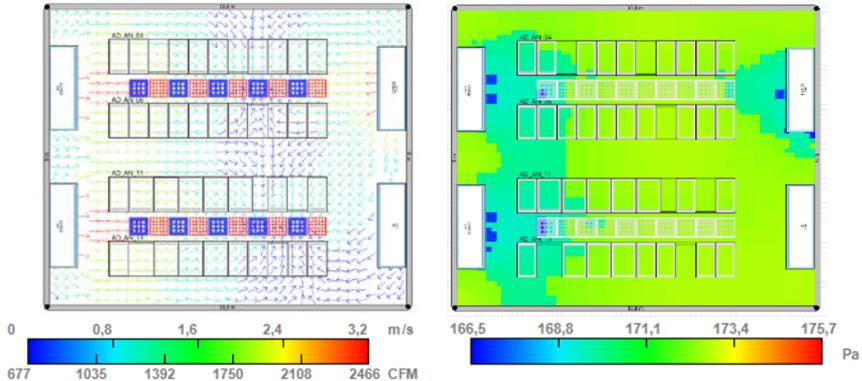
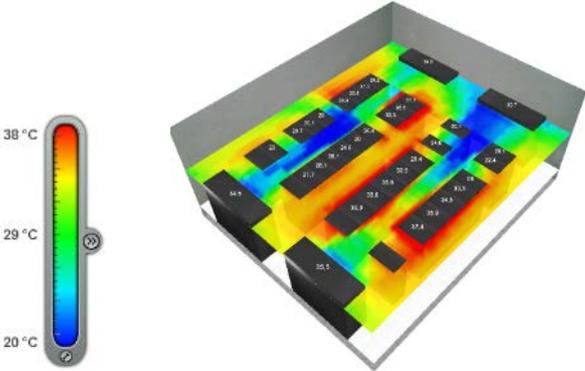
Quadro 23 - Simulação H.

Simulação H	Expansão – Carga: 240 kW – Organização de placas perfuradas
Grupo de Informação	Descrição
I	<p>Organização das placas de piso elevado, ainda de modo simétrico (não balanceado) viabiliza elevação da carga até o plano de ocupação de 240 kW. Neste nível de carga a demanda de vazão dos CRAH já é reduzida da máxima, pelos ganhos de eficiência de troca entre ar e fonte de calor.</p>
II	
III	
IV	

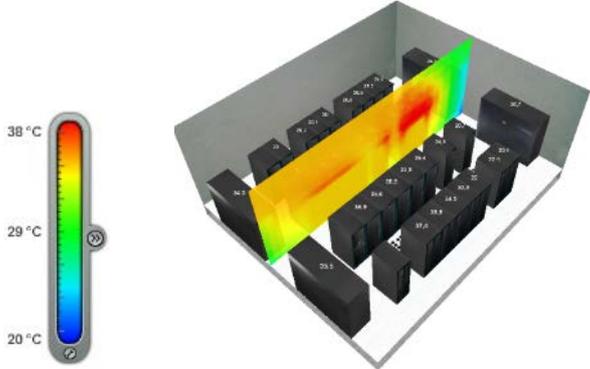
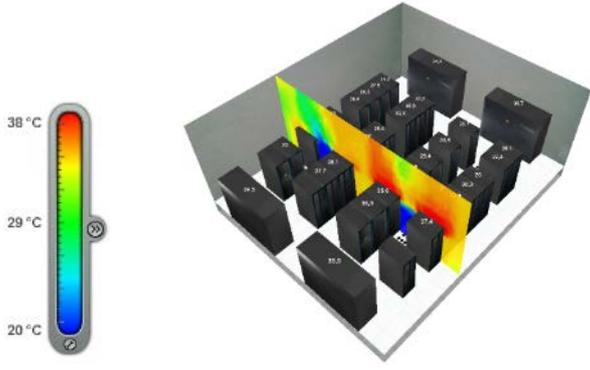
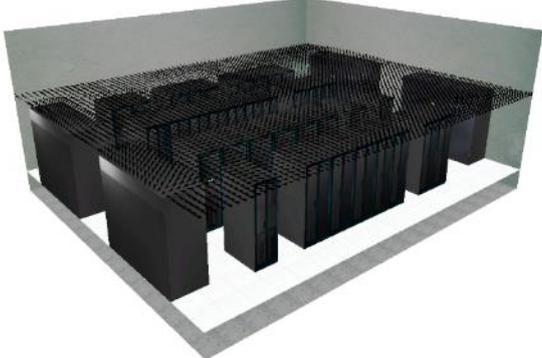
Quadro 24 - Simulação H (Continuação).

Simulação H	Geometria Inicial – Organização de placas perf. (Continuação)
Grupo de Informação	Descrição
V	
VI	
VII	
VIII	<p>Verifica-se que, mesmo na condição de carga planejada não há insuficiência de captação (II), pontos quentes estão regularmente posicionados nos corredores quentes, contudo são intensos (V) assim como os focos de recirculação (VI). Necessário atuar no balanceamento de cargas para esta configuração de CQ/CF.</p>

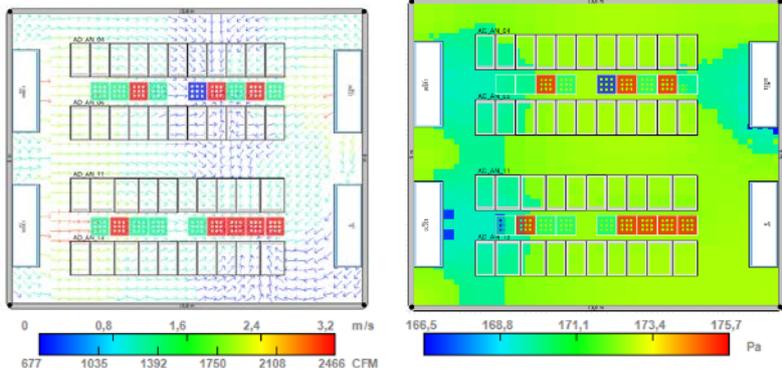
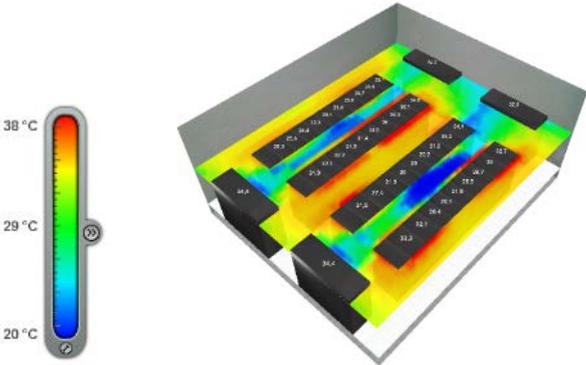
Quadro 25 - Simulação I.

Simulação I	Adequação – Carga: 240 kW
Grupo de Informação	Descrição
I	<p>Distribuição de cargas entre <i>racks</i>, com formação de blocos de maior densidade próximo às pontas das filas, devido ao núcleo ZDA (<i>Zone Distribution Area</i> – telecomunicações – baixa potência elétrica e carga térmica) no centro das filas e de usual baixa densidade de carga e pouca demanda de vazão. Nova redução de vazão nos <i>CRAH</i> foi obtida.</p>
II	
III	
IV	

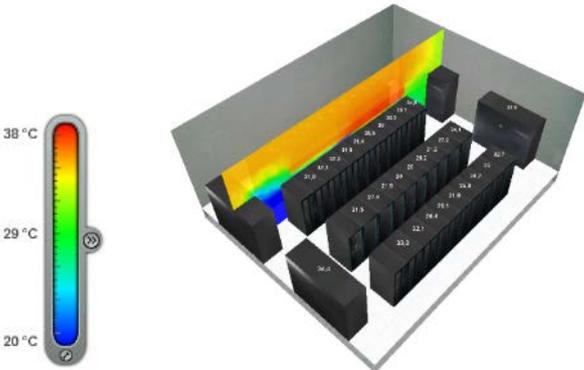
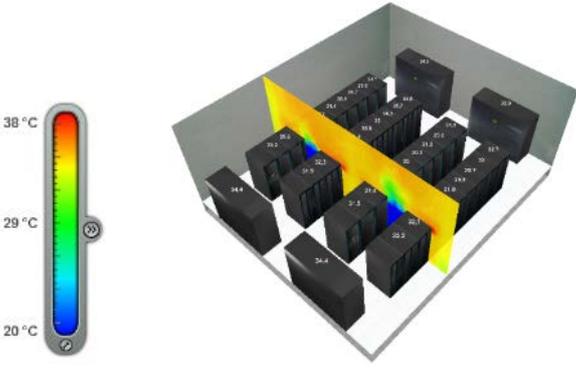
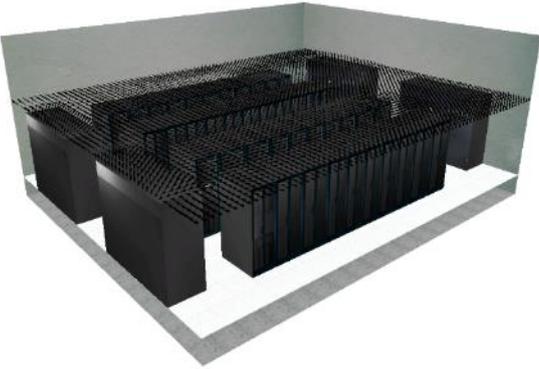
Quadro 26 - Simulação I (Continuação).

Simulação I	Geometria Inicial (Continuação)
Grupo de Informação	Descrição
V	
VI	
VII	
VIII	<p>Com a redução da vazão para os <i>CRAH</i> foi possível manter os índices de captação suficientes (II). Entretanto, o fluxo de ar não está ajustado proporcionalmente à demanda, isto é, o posicionamento e a abertura de placas perfuradas de piso elevado, em relação às cargas de cada <i>rack</i> ((II) e (III)), não está balanceado. Balancear.</p>

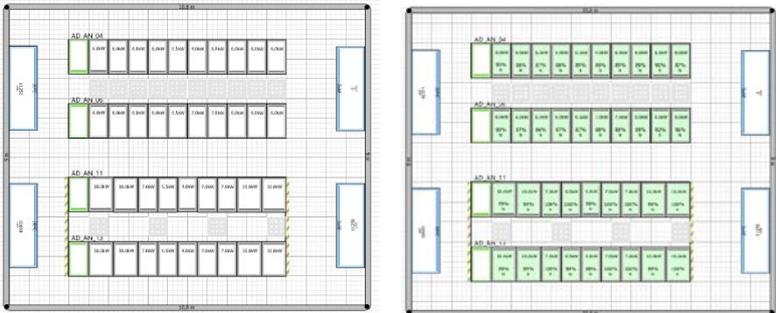
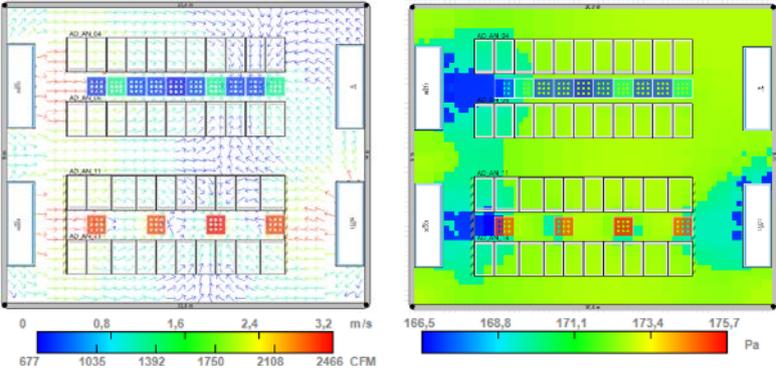
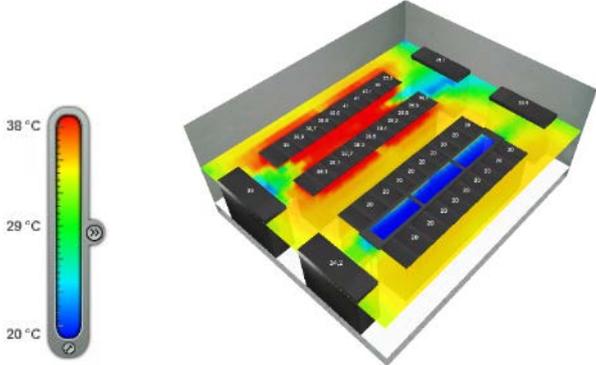
Quadro 27 - Simulação J.

Simulação J	Adequação – Carga: 240 kW
Grupo de Informação	Descrição
I	<p>Balanceamento de vazões das placas perfuradas de piso elevado conforme as demandas de fluxo (carga) dos racks, com o auxílio de <i>CFD</i>, a saber:</p> <p>CF04_06: 17%-17%-25%-17%-00%-08%-25%-17%-25%-17%</p> <p>CF11_13: 17%-25%-17%-17%-00%-17%-25%-25%-25%-25%</p> <p>Nova redução na demanda de vazão para os <i>CRAH</i> foi obtida.</p>
II	
III	
IV	

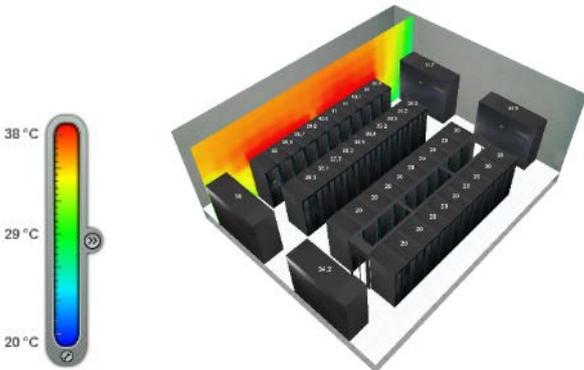
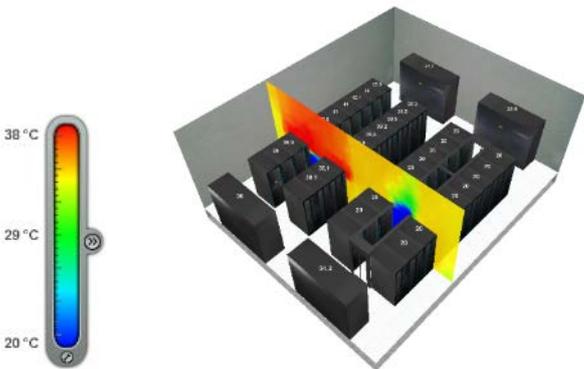
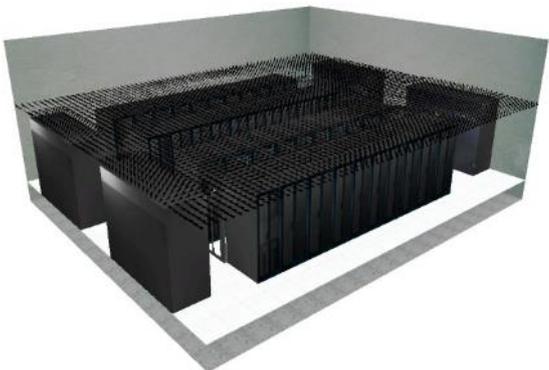
Quadro 28 - Simulação J (Continuação).

Simulação J	Geometria Inicial (Continuação)
Grupo de Informação	Descrição
V	
VI	
VII	
VIII	<p>Plena suficiência de suprimento de vazão (índices de captação) (II) com coordenação razoável de temperaturas nos corredores ((IV), (V) e (VI)). Com a existência de <i>racks</i> de média densidade e a possibilidade de implementação de alta densidade, implementar solução de enclausuramento de corredor.</p>

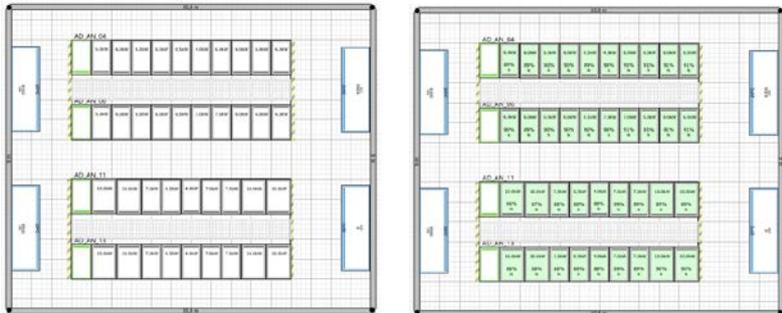
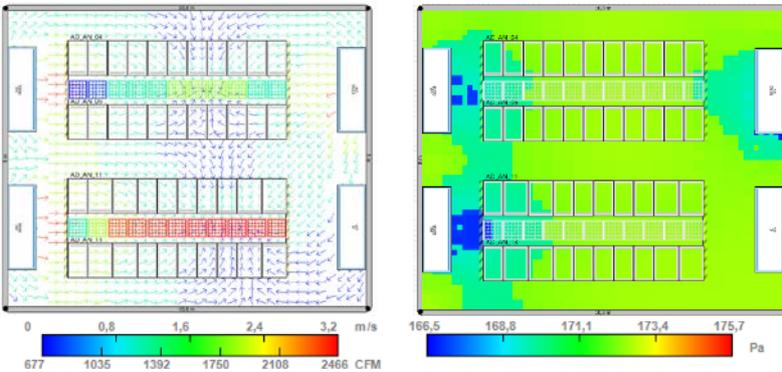
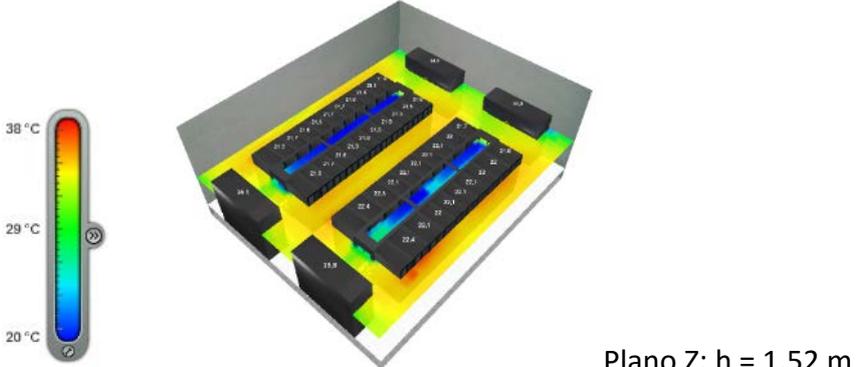
Quadro 29 - Simulação K.

Simulação K	Adequação – Carga: 240 kW
Grupo de Informação	Descrição
I	Implementação de enclausramento em corredor frio 11_13, viabilizando a redução significativa da demanda de vazão para os CRAH.
II	
III	
IV	

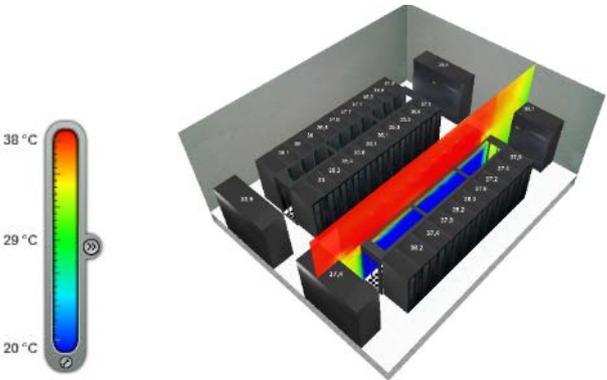
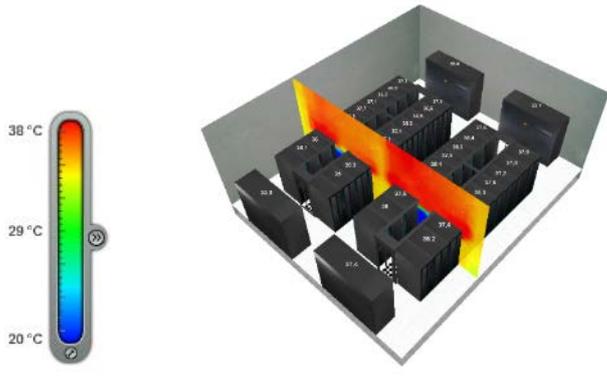
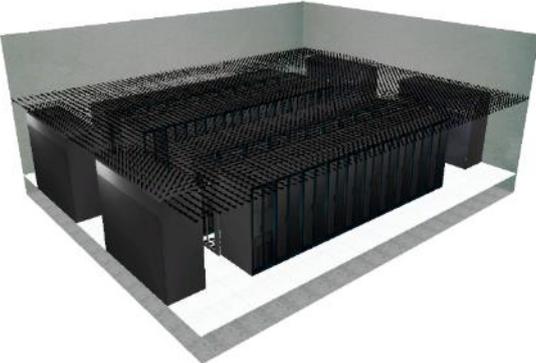
Quadro 30 - Simulação K (Continuação).

Simulação K	Geometria Inicial (Continuação)
Grupo de Informação	Descrição
V	
VI	
VII	
VIII	<p>A solução de enclausuramento de corredor torna o fluxo de ar condicionado eficaz e elimina a mistura naquele corredor ((IV), (V) e (VI)). A utilização de soluções mistas pode provocar igualmente gradientes intensos de pressão devido à grande diferença de vazões por demanda entre a região enclausurada e a não enclausurada podendo ocorrer pressão negativa (III). Seguir com o plano de enclausuramento para o segundo corredor frio.</p>

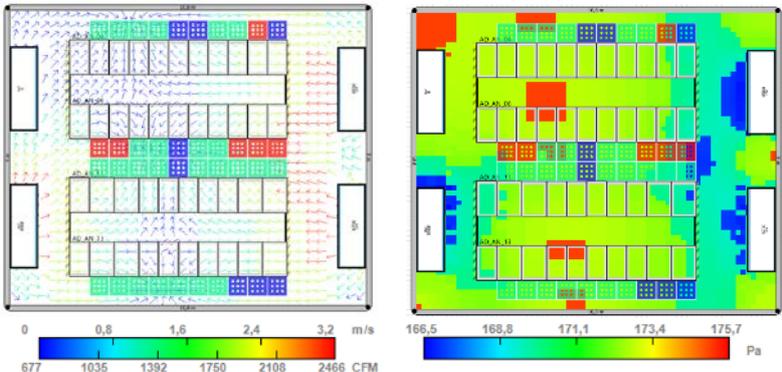
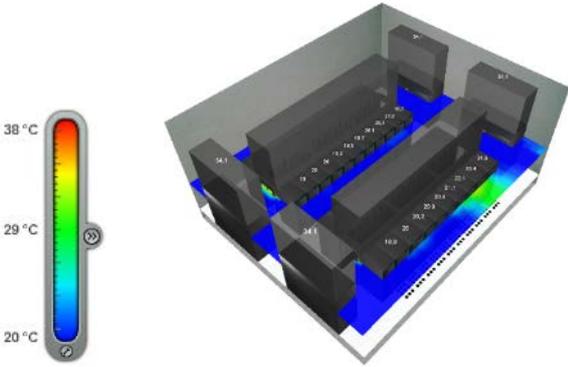
Quadro 31 - Simulação L.

Simulação L	Adequação – Carga: 240 kW
Grupo de Informação	Descrição
I	<p>Implementação de segundo enclausuramento no corredor frio 04_06, viabilizando nova redução de vazão para os CRAH.</p>
II	
III	
IV	 <p>Plano Z: h = 1,52 m</p>

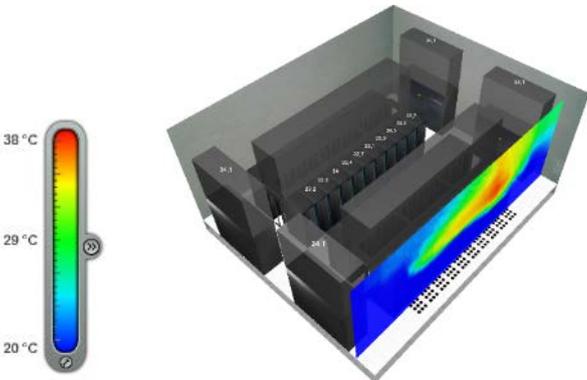
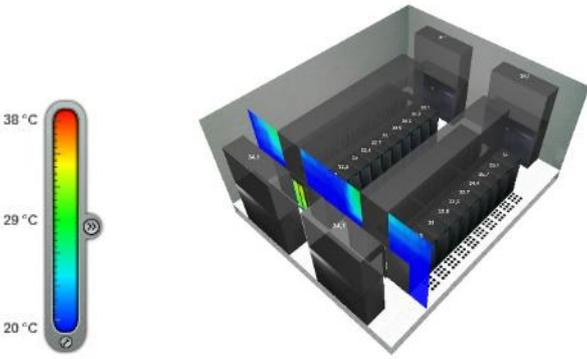
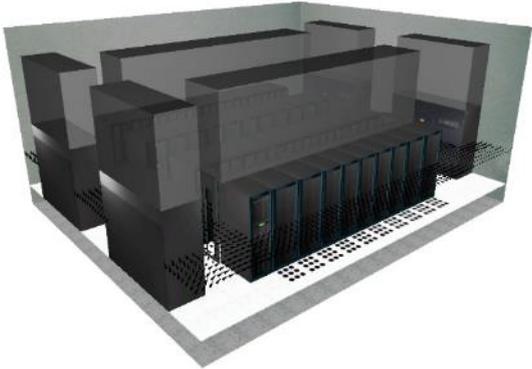
Quadro 32 - Simulação L (Continuação).

Simulação L	Geometria Inicial (Continuação)
Grupo de Informação	Descrição
V	
VI	
VII	
VIII	<p>Todo o sistema encontra-se com grande eficiência, com diferença importante nas temperaturas de insuflamento e retorno. Verifica-se 20 °C no insuflamento e 35 °C no retorno. Se o equipamento de AVAC for capaz para essa diferença de teperaturas (tecnologia), é um grande potencial para alta eficiência energética. Alternativamente, substituir os corredores frios enclausurados por corredores quentes enclausurados, em determinados projetos resulta ainda maior eficiência.</p>

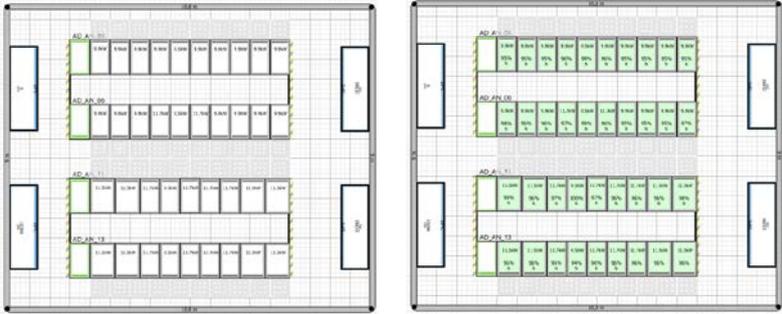
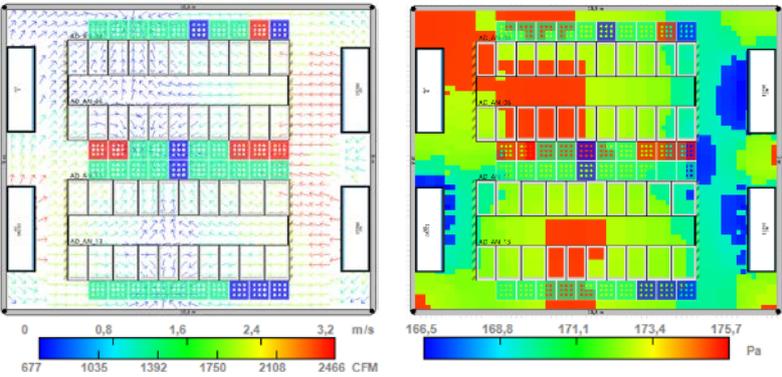
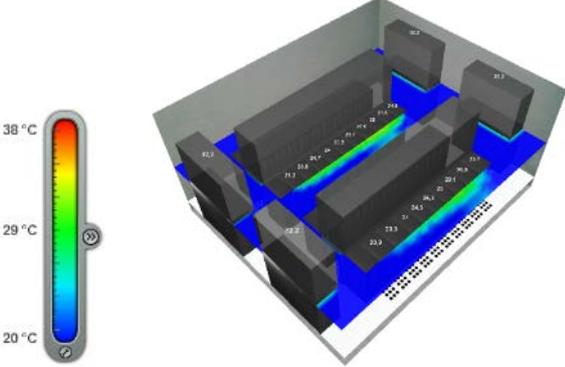
Quadro 33 - Simulação M.

Simulação M	Adequação – Carga: 240 kW
Grupo de Informação	Descrição
I	<p>Alternativa de enclausuramento nos corredores quentes, minimizando área de recirculação (vazamento para mistura - 5%) pelo piso elevado e forro (<i>plenuns</i> de insuflamento e retorno respectivamente) entre massa quente e massa fria de ar.</p>
II	
III	
IV	 <p>Plano Z: h = 1,52 m</p>

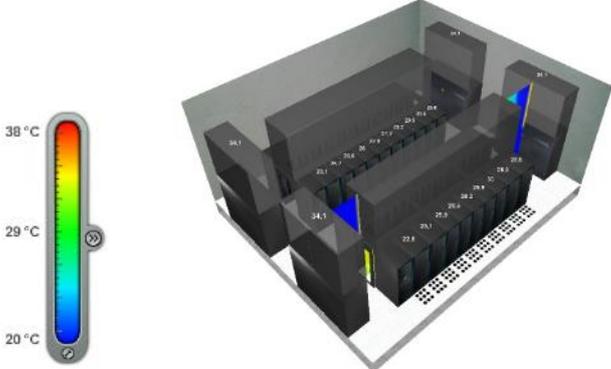
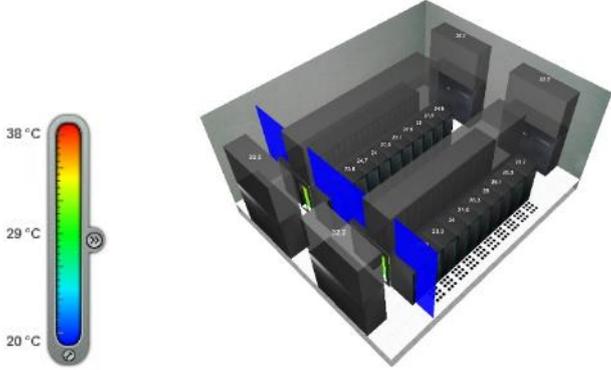
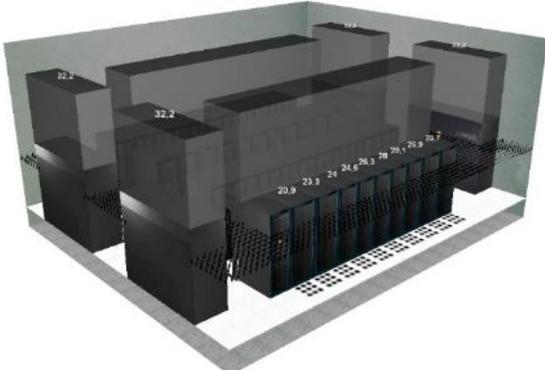
Quadro 34 - Simulação M (Continuação).

Simulação M	Adequação – Carga: 240 kW
Grupo de Informação	Descrição
V	
VI	
VII	
VIII	<p>Alcançada a carga planejada para o ambiente e estando os parâmetros operacionais satisfatórios</p>

Quadro 35 - Simulação N.

Simulação N	Expansão – Carga: 396,4 kW – Limite de capacidade
Grupo de Informação	Descrição
I	Elevada a carga até o limite de capacidade dos <i>CRAH</i> .
II	
III	
IV	 <p data-bbox="1166 1899 1398 1933">Plano Z: h = 1,52 m</p>

Quadro 36 - Simulação N (Continuação).

Simulação N	Expansão – Carga: 396,4 kW – Limite de capacidade (Continuação)
Grupo de Informação	Descrição
V	
VI	
VII	
VIII	<p>Operar em condição limítrofe é uma excessão num sistema adequadamente projetado. Contudo este modelo apresentou coordenação de fluxo capaz para a carga limítrofe calculada, até 65% superior à carga projetada de 240 kW.</p>

5. CONCLUSÃO

5.1. PONTOS MAIS SIGNIFICATIVOS DOS RESULTADOS

Usuários e gestores de *data centers*, pelo ponto de vista das instalações físicas (*DCPI*), regularmente encontram dificuldades na seleção da solução adequada de coordenação de fluxo de ar condicionado nas salas de dados.

Para melhor aproveitar os recursos de infraestrutura disponíveis, devem buscar a melhor eficiência dos recursos, o que inclui a correta utilização do sistema VAC, que é o maior consumidor de energia depois dos ativos de TIC.

Reduzindo o consumo de energia, para um dado volume de serviços de TIC, impacta-se positivamente quanto à sustentabilidade das operações e do planeta, de modo geral, visto os números impactantes desta operação no mercado.

O trabalho demonstrou, com uma sequência de implementações baseadas em melhores práticas, os respectivos resultados através de modelos computacionais (*CFD*), justificando os passos, comprovando os efeitos, a eficácia e a economia de recursos de desenvolvimento, propiciados pela utilização dessa ferramenta.

Pode-se utilizar destas simulações, assim como das informações de contextualização, para balizar as impressões e as decisões em processos de melhoria de ambientes de salas de dados de *data centers* ou mesmo na construção de novas instalações.

5.2. TRABALHOS FUTUROS

Este desenvolvimento sugere o prosseguimento com a preparação de modelos mais completos, incluindo outras soluções de coordenação de fluxo do ar em salas de dados de *data centers*, considerando variantes das soluções apresentadas, as que começam a surgir no mercado de TIC e *data centers* como, por exemplo, empregando *racks* refrigerados (com sistemas de refrigeração embarcados nos próprios *racks*).

A frequente e crescente utilização de *data centers* modulares (conhecidos como “*containers*” ou “*shelters*”) e até mesmo soluções muito inovadoras de

sistemas refrigerados por fluidos refrigerantes em circuito fechado em contato direto com os componentes quentes internos dos ativos de TIC (trocadores de calor internos aos computadores e processadores), também trarão dúvidas e a necessidade de orientação para o usuário ou proprietário, quando de suas decisões de investimento nas soluções de melhor rendimento operacional.

Não obstante a tecnologia de TIC estar evoluindo para componentes de menor consumo energético, portanto, de menor dissipação de calor, as projeções de crescimento da demanda por serviços de TIC crescem em ritmo mais acentuado, seguindo em forte medida e além, a referida “Lei de Moore”.

O progressivo e exponencial ganho de capacidade acompanhado da redução de tamanho dos ativos de TIC, incluindo-se aí o horizonte imposto pela chegada da demanda de serviços da *IoT* (“*Internet of Things*”) (Internet das Coisas), leva a expectativa da curva de crescimento a assumir um perfil de efetiva singularidade, o que torna difícil prever as tendências do mercado.

O campo é vasto e demanda trabalhos como este, oportunamente alinhados com essa rápida evolução e transformação tecnológica, contribuindo para a adequação e desenvolvimento de melhores práticas na infraestrutura de *data centers* futuros adaptados para essa nova realidade.

Serão trabalhos de importância vital para apoiar os usuários, operadores de *data centers* e *CIOs* a decidirem com eficácia e eficiência, mesmo com projeções turbulentas de crescimento nessa transição.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGUIAR, M.C. **Análise de causa-raiz: Levantamento dos métodos e exemplificação.** Rio de Janeiro: PUCRJ, 2014. 153 f. Dissertação (Mestrado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Industrial, Rio de Janeiro, 2014.

ANDREA, M. **Data center size and density.** DCI AFCOM *White Paper* # DCISE-001, 19 p., 2014.

ASHRAE. **Data center networking equipment – issues and best practices.** *White Paper* preparado por ASHRAE American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Technical Committee (TC) 9.9, 2013.

AVELAR, V. **Guidance for calculation of efficiency (PUE) in data centers.** SCHNEIDER ELECTRIC *White Paper* #158, 12 p., 2011.

AVELAR, V; AZEVEDO, D; FRENCH, A. **PUE™: A Comprehensive Examination of The Metric.** ‘the green grid’ *White Paper* #49, 2012.

CASTRO, J.L.R. DE **A missão crítica na articulação das áreas de infraestrutura, telecomunicações e tecnologia da informação do data center; um estudo de seus significados e efeitos.** Brasília: UnB, 2010. 144 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Elétrica, Brasília, 2010.

DUNLAP, K.; RASMUSSEN, N. **The advantages of row and rack-oriented cooling architectures for data centers.** APC American Power Conversion *White Paper* #130, 21 p., 2006.

FIGUEIREDO, J.J.C. **Análise de dependabilidade de sistemas data center baseada em índices de importância.** Recife: UFPE, 2011. 88 f. Dissertação

(Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Informática, Ciência da Computação, Pernambuco, 2011.

HINTERMANN, R. ***The future of data center energy demand – The impact of changing structure of data centers.*** Borderstep Institut Berlin. *Poster #23*, 1p., 2014. Disponível em <https://www.researchgate.net/publication/271202965_The_Future_of_Data_Center_Energy_Demand_The_Impact_of_the_Changing_Structure_of_Data_Centers> Acesso em 26 de setembro de 2016.

JOSHI, Y; KUMAR, P. ***Energy Efficient Thermal Management of Data Centers.*** Atlanta-GA/USA, 2012. 624 p. e-ISBN 978-1-4419-7124-1

MANGAL, V. ***Sustainability – is it for the CIO?*** EGJ Electronic Green Journal. UCLA Library, UC Los Angeles, Anderson School of Management. Issue 29, 2009. Disponível em <<http://escholarship.org/uc/item/0rp658mr>> Acesso em 26 de setembro de 2016.

MARSHALL, L.; BEMIS, P. ***Using CFD for data center design analysis.*** Applied Math Modeling, Inc. White Paper #107, 17 p., 2011.

PONEMON INSTITUTE, ***2013 Study on data center outages.*** Ponemon Institute LLC. Disponível em <<http://www.ponemon.org/library/2013-cost-of-data-center-outages?s=Data+Center+Outages>> Acesso em 15 de setembro de 2016.

PONEMON INSTITUTE, ***Cost of data center outages January 2016, Data Center Benchmark Series,*** Ponemon Institute LLC. Disponível em <<http://www.emersonnetworkpower.com/en-US/Resources/Market/Data-Center/Latest-Thinking/Ponemon/Pages/2016-Cost-of-Data-Center-Outages-Report.aspx>> Acesso em 15 de setembro de 2016.

PRODANOV, C.C.; FREITAS, E.C. **Metodologia do trabalho científico [recurso eletrônico]. Métodos e técnicas da pesquisa e do trabalho acadêmico.** – 2ª ed. – Novo Hamburgo: Editora Feevale, 2013, 276 p.

RASMUSSEN, N. ***Calculating space and power density requirements for data centers.*** SCHNEIDER ELECTRIC White Paper #155, 19 p., 2013.

RASMUSSEN, N. **Implantação de *data centers* com eficiência energética.** SCHNEIDER ELECTRIC *White Paper* #114, 14 p. 2012.

REALWISH SINGAPORE (2002-2015), ***Resources – Overview of Data Center Facility.***

Disponível em <<http://www.realwish.com/resources.html>> Acesso em 18 de setembro de 2016.

SALIM, M. ***Optimizing air management metrics by containment is the first step to data centers green transformation.*** *Section Four*, pág. 79 a 91 [2010]

SAMPAIO, J.J.M. ***Cognitive Automation, Operational Decision and Human Error*** (August 8, 2009). *Errar Ainda é Humano?* Revista Sociedade e Trabalho, No's. 11/12, 2002. Disponível em <<http://ssrn.com/abstract=1205176>> Acesso em 10 de setembro de 2016.

SASSER, J. ***A look at data center cooling technologies.*** Journal, Uptime Institute. 2016. Disponível em <<https://journal.uptimeinstitute.com/a-look-at-data-center-cooling-technologies/>> Acesso em 13 de setembro de 2016.

SIEMON (2016) ***Standards Informant TIA-942-A Data Center Energy Efficient Design Overview.*** Disponível em <<http://blog.siemon.com/standards/author/admin/page/4>> Acesso em 18 de setembro de 2016.

SILVA, N.R. DA **Ti verde – Armazenamento de dados e a eficiência energética no *data center* de um banco brasileiro**. São Paulo: UNINOVE, 2015. 141 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Nove de Julho, Programa de Pós-Graduação em Administração, Gestão Ambiental e Sustentabilidade, São Paulo, 2015.

STRONG, L. ***Rack gaps: The commonly overlooked holes in the data center***, UPSITE TECHNOLOGIES, Inc. 2014. Disponível em <<http://www.upsite.com/blog/rack-gaps-commonly-overlooked-holes-data-center/>> Acesso em 13 de setembro de 2016.

TELEFONICA VIVO, ***Data center Telefonica Vivo conquista certificação máxima para sua operação***. 2015. Artigo de divulgação. Disponível em <<http://www.telefonica.com.br/servlet/Satellite?c=Documento&cid=1386094811865&pagename=InstitucionalVivo%2FDocumento%2FLayoutDocumento>> Acesso em 15 de setembro de 2016.

TIA. ***Telecommunications Infrastructure Standard for Data Centers***. Norma ANSI/TIA-942, 2005.

TOZER, R.; SALIM, M. ***Data center air management metrics-practical approach***. IEEE Xplore Digital Library, pág. 1 a 8. [2010]

WHITNEY, J.; DELFORGE, P. ***Scaling up efficiency across the data center industry: Evaluating key drivers and barriers***. Data Center Efficiency Assessment, Natural Resources Defense Council (NRDC), 34 p., 2014.

ZUCCHI, L.W.; AMÂNCIO, A.B. ***Construindo um data center. Dossiê computação em nuvem***. REVISTA USP, São Paulo, n. 97, p. 43-58, 2013.

GLOSSÁRIO

- Calor Sensível** – Que muda a temperatura de um corpo. (N. do A.)
- Calor Latente** – Que muda o estado da substância sem alterar a temperatura. (N. do A.)
- Cloud Computing** – Computação em nuvem é um termo geral para a entrega de serviços (N. do A.: de TIC) hospedados através da internet. (TECHTARGET WHATIS WWW, 2016)
- Collocation** – Um *data center* de *collocation* é uma instalação na qual uma instituição pode alugar espaço para seus ativos de TIC. O *data center* de *collocation* tipicamente provê espaço, refrigeração, energia, telecomunicações e segurança física, enquanto o cliente provê os servidores de processamento e *storage*. (TECHTARGET WHATIS WWW, 2016)
- Consolidação** – Abordagem voltada para o uso eficiente de recursos de computação em servidores com a redução do número total de servidores (N. do A.: físicos) ou localidades de hospedagem, requeridos por uma organização. (TECHTARGET WHATIS WWW, 2016)

- Dependabilidade** – Do inglês *dependability*, qualidade do serviço fornecido. Inclui: disponibilidade, confiabilidade, segurança, confidencialidade, integridade e manutenibilidade. (AVIZIENIS et al., 2001 apud FIGUEIREDO, J.J.C., 2011 p.13)
- Descomissionamento** – Processo coordenado de desativação e remoção de ativos, com dependabilidade assegurada. (N. do A.)
- Hosting** – Modalidade de locação de capacidade de processamento e armazenagem em *data centers*. É o negócio de hospedagem, processamento e manutenção de arquivos para um ou mais *web sites*. (TECHTARGET WHATIS WWW, 2016)
- Key Performance Indicator** – Indicador Chave de Desempenho. É uma métrica de negócio usada para avaliar fatores que são cruciais para o sucesso de uma organização (TECHTARGET WHATIS WWW, 2016). Apresenta um parâmetro significativo, mensurável, calculável e representativo do desempenho de um processo. (N. do A.)
- Service Level Agreement** – Acordo de Nível de Serviço com o qual um ofertante de serviços compromete-se a um determinado nível de qualidade de serviços perante o tomador dos serviços e que são definidos, medidos e controlados por indicadores chave dos processos (ICP ou *KPI - Key Performance Indicator*). Eventualmente estes acordos contam com bonificações e/ou penalidades. (N. do A.)

- Servidor de *Storage* – Servidor de armazenagem de dados. (N. do A.)
- Testabilidade – Capacidade de um sistema, processo ou código ser parametricamente testado e aferido, segundo um ciclo de hipóteses, dedução de predição, observações de testes e indução a novas hipóteses. Com a repetição a hipótese pode ser aceita como fato. (SUTTLEWORTH, 2008)
- Virtualização – É a criação de uma versão virtual de alguma coisa, como um sistema operacional, um servidor, um dispositivo de armazenamento ou recursos de rede. (TECHTARGET WHATIS WWW, 2016)

APÊNDICE A – Resultados Agrupados das Simulações

Tabela 9 - Resultados agrupados das simulações CFD.

Airranjo	Modelo	Antigo	Condição	Área: 97,2 m ²	Racks	Carga Total [W]	Carga Incremento [W]	Densidade [kW/Rack]	Vazão CRAH [CFM]	#01	#02	#03	#04	Rendimento VAC [W/CFM]	Capacidade CRAH Volume	Máx.: 8 W/CFM Efc. de Transporte	Nota	
A	08D		Condição reguladamente encontrada em ambientes pequenos e médios. Usuário considera que CRAHs não tem capacidade para a carga nominal. Não logram adicionar carga no ambiente.	12	4000	0	0	8,10	421,81	46170	15390	0	15390	0,89	100%	11%		
B	08C		Tentativa de adicionar 2 racks / carga de 2,5 kW totais, mal sucedida.	14	43500	2500	2500	6,94	447,53	46170	15390	0	15390	0,94	100%	12%		
C	08A		Placês RPP repositados para filas organizadas (CF/CQ) e racks alinhados para as filas. Com isto, a potência pôde ser elevada para a capacidade dos CRAHs.	18	61000	17500	17500	5,40	627,57	46170	15390	0	15390	1,32	100%	17%		
D	08		Tentativa de adicionar 11 racks / carga de 115,5 kW totais, mal sucedida.	29	176500	115500	115500	3,35	1815,84	46170	15390	0	15390	3,82	100%	48%		
E	07D		Giro de racks invertidos para obter CQ/CF, viabiliza a implementação na capacidade dos CRAHs.	29	176500	0	0	3,35	1815,84	46170	15390	0	15390	3,82	100%	48%		
F	07E1		Teste de falha do CRAH #04 aponta a necessidade de limitar carga.	29	176500	0	0	3,35	1815,84	46170	15390	15390	0	3,82	100%	48%		
G	07E		Ajuste da carga para a capacidade dos CRAHs.	28	176000	-500	-500	3,47	1810,70	46170	15390	15390	0	3,81	100%	48%		
H	06		Organização das placas de PE ainda de modo simétrico (não ajustado) viabiliza elevação da carga até um plano de ocupação de 240 kW. Neste nível de carga a demanda de vazão dos CRAHs já é reduzida da máxima, pelos ganhos de eficiência de troca de calor entre ar e fonte de calor.	31	240000	64000	64000	3,14	2469,14	41100	13600	0	13750	5,84	89%	73%	Já com a falha de CRAH crítica.	
I	05		Distribuição de cargas entre racks com formação de blocos de maior densidade próximo às pontas das filas devido ao núcleo ZDA no centro das filas de usual baixa densidade de carga.	38	240000	0	0	2,56	2469,14	37460	12000	11900	13560	0	6,41	81%	80%	Já com a falha de CRAH crítica.
J	04A		Balanciamento de vazões das placas perfuradas de piso elevado em alinhamento com as demandas de fluxo (carga) dos racks, com o auxílio de CFD, a saber: CF04_06: 17%-25%-17%-08%-25%-17%-25%-17% CF11_13: 17%-25%-17%-17%-08%-25%-17%-25%-25%-25%	38	240000	0	0	2,56	2469,14	36100	11900	12200	12000	0	6,65	78%	83%	Já com a falha de CRAH crítica.
K	04		Implementação de endausuramento em corredor frio 11_13, viabilizando a redução de vazão para os CRAHs.	38	240000	0	0	2,56	2469,14	32500	11250	0	10000	11250	7,38	70%	92%	Já com a falha de CRAH crítica.
L	03A		Implementação de segundo endausuramento em corredor frio 04_06, viabilizando nova redução de vazão para os CRAHs.	38	240000	0	0	2,56	2469,14	28100	9300	9300	9500	0	8,54	61%	107%	Já com a falha de CRAH crítica.
M	02		Alternativa de endausuramento nos corredores quentes, minimizando área de bypass (vazamento - 5%) pelo PE e forro (plenums de insuficiência e retorno respectivamente) entre massa quente e massa fria de ar.	38	240000	0	0	2,56	2469,14	26100	0	8500	8800	8700	9,20	57%	115%	Já com a falha de CRAH crítica.
N	n/a		Elevada a carga até o limite de capacidade dos CRAHs.	38	369400	129400	129400	2,56	3800,41	46170	0	15390	15390	8,00	100%	100%	Já com a falha de CRAH crítica.	