

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO ESCOLA POLITÉCNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

**AVALIAÇÃO DA ESTRATÉGIA DE SISTEMAS DEDICADOS DE
TRATAMENTO DE AR EXTERNO PARA REDUÇÃO DE
CONSUMO DE ENERGIA EM EDIFICAÇÕES CLIMATIZADAS
(DATA CENTER)**

Guilherme Akira Matsumoto

São Paulo

2017

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO ESCOLA POLITÉCNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

**AVALIAÇÃO DA ESTRATÉGIA DE SISTEMAS DEDICADOS DE
TRATAMENTO DE AR EXTERNO PARA REDUÇÃO DE
CONSUMO DE ENERGIA EM EDIFICAÇÕES CLIMATIZADAS
(DATA CENTER)**

Trabalho de formatura apresentado à Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo para
obtenção do título de Graduação em Engenharia

Guilherme Akira Matsumoto

Orientador: Alberto Hernandez Neto

Área de Concentração:
Engenharia Mecânica

São Paulo

2017

RESUMO

Sistema de aquecimento, ventilação e ar condicionado (AVAC) convencionais em edificações comerciais atendem tanto à ventilação de ar externo quanto à climatização do ambiente usando uma distribuição ar que mistura ar externo com ar de recirculação, com intuito de alcançar condições termo-higrométrica adequadas dentro do espaço ocupado. Este trabalho propõe a implantação de um sistema que realiza o tratamento dedicado de ar externo, conhecido como DOAS (*dedicated outdoor air system*). Para isso, foi feito uma revisão bibliográfica sobre o DOAS, encontrando diversas vantagens como melhor controle de umidade, entrega garantida de fluxo de ar de ventilação e reduzido uso de energia. Os artigos revisados utilizam o termo DOAS atrelado com algum sistema de recuperação de calor, por exemplo, utilizando uma roda entálpica. O propósito deste trabalho é estudar o efeito de um sistema de tratamento dedicado de ar externo sem qualquer sistema de recuperação de calor. Para isso foi modelado uma edificação com perfil de ocupação típico de uma central de processamento de dados (*data center*), que será simulado por meio da ferramenta Energy Plus para avaliar o potencial impacto que pode ser obtido na redução de consumo de energia com o uso de DOAS. Foram também feitas análises de parâmetros e condições de entrada como perfis climáticos e temperatura do ambiente climatizado desejada, de forma a verificar o efeito destes parâmetros no desempenho do sistema de tratamento dedicado de ar externo.

ABSTRACT

Conventional heating, ventilation and air-conditioning (HVAC) systems in commercial buildings meet both outdoor air ventilation and space conditioning requirements using air distribution approaches that provide a mixture of outdoor air and recirculated air with the goal of achieving good air mixing within the occupied space. This paper proposes to implant a system that promotes the dedicated outdoor air treatment, known as DOAS (dedicated outdoor air system). A literature review related to DOAS was made, finding several advantages as improved humidity control, assured delivery of proper ventilation airflow quantities, and reduced energy use. The revised articles use the term DOAS coupled with some heat recovery system, for example, using an enthalpic wheel. The purpose of this work is to study the effect of a dedicated external air treatment system without any heat recovery. For that, a building with typical data center profile is modeled and simulated using the software Energy Plus in order to evaluate the impact in the energy consumption of a data center using DOAS system. The effect of parameters such climate data and room air temperature is evaluated regarding the performance of dedicated outdoor air system.

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	8
2.	OBJETIVOS	13
2.1.	Metodologia.....	13
3.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
3.1.	Análise de desempenho de sistemas dedicados de tratamento de ar externo (DOAS)	14
3.2.	<i>Data Center</i> : características principais e índices de desempenho.....	14
3.2.1.	Características principais	14
3.2.2.	Normas Relacionadas ao Projeto e Operação de um <i>Data Center</i>	16
3.2.3.	Principais Tipos de <i>Data Center</i>	21
3.2.4.	Métodos para Avaliação do Desempenho de um <i>Data Center</i>	25
4.	SIMULAÇÃO.....	29
4.1.	MATERIAIS E MÉTODOS	29
4.2.	MODELO DA EDIFICAÇÃO	30
4.3.	SIMULAÇÃO DA EDIFICAÇÃO REFERÊNCIA SEM E COM DOAS	31
4.3.1.	Resultados da simulação para a edificação de referência	31
4.3.2.	Resultado da simulação com DOAS	33
4.4.	SIMULAÇÃO MENSAL PARA DIFERENTES CLIMAS BRASILEIROS ..	36
4.5.	SIMULAÇÃO COM DIFERENTES PERFIS DE OCUPAÇÃO	38
4.6.	SIMULAÇÕES FINAIS.....	39
5.	CONCLUSÃO	41

6. REFERÊNCIAS.....	42
---------------------	----

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Sistema de climatização convencional	8
Figura 2 – Sistema de climatização com DOAS	8
Figura 3 – Evolução da potência dos equipamentos de tecnologia da informação (ASHRAE, 2011)	11
Figura 4 – Composição do consumo total de energia elétrica de um <i>data center</i> típico (adaptado de Parker et al (2007))	11
Figura 5 – Arranjo de um típico <i>data center</i> (López&Hamann (2011)).....	16
Figura 6 – Classes ambientais da ASHRAE para <i>Data Centers</i> (ASHRAE, 2011)	20
Figura 7 - Resfriamento utilizando piso elevado e corredores quentes e frios (ASHRAE, 2011)	22
Figura 8 - Resfriamento utilizando piso elevado e corredores quentes e frios com equipamentos de infraestrutura elétrica e mecânica localizados fora da sala de servidores (ASHRAE, 2011)	23
Figura 9 – Resfriamento utilizando piso elevado e corredores quentes e frios com insuflamento e retorno dutados (ASHRAE, 2011)	23
Figura 10 – Resfriamento utilizando piso elevado com corredores quentes e frios (ASHRAE, 2011)	24
Figura 11 – Insuflamento dutado pelo forro (ASHRAE, 2011).....	25
Figura 12 - Modelo do <i>data center</i> no SketchUp.....	30

LISTA DE TABELAS

Tabela 1– Diretrizes Térmicas ASHRAE 2008 (ASHRAE, 2011).....	18
Tabela 2 – Diretrizes Térmicas ASHRAE 2011 (ASHRAE, 2011).....	19
Tabela 3 – Comparação entre as versões de 2004 e 2008 para limites recomendados	21
Tabela 4 – Classificação da eficiência de um <i>data center</i> baseada no PUE	26
Tabela 5 – Classificação da eficiência de um <i>data center</i> baseada no DCiE	26

Tabela 6 – Classificação da eficiência de um <i>data center</i> baseada no DCiE	29
Tabela 7 – Consumo anual de energia da edificação de referência	32
Tabela 8 - Consumo anual de energia da edificação com DOAS para diferentes temperaturas de entrada de ar externo para renovação.	34
Tabela 9 – Características dos ambientes simulados	38
Tabela 10 - Consumo anual de energia da edificação com DOAS para diferentes temperaturas de entrada de ar externo para renovação. (COP = 3,2).....	40

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Matriz de consumo desagregado da edificação de referência na cidade de São Paulo.....	33
Gráfico 2 – Variação percentual do consumo anual de energia entre a edificação de referência e a edificação com DOAS	35
Gráfico 3 - Variação do consumo energético mensal (São Paulo).....	36
Gráfico 4 - Variação do consumo energético mensal (Curitiba).....	37
Gráfico 5 - Variação do consumo energético mensal (Chicago)	37
Gráfico 6 – Variação de consumo anual de energia da edificação com sistema DOAS em relação a edificação de referência para um escritório de alta densidade para a cidade de São Paulo.....	39

1. INTRODUÇÃO

Há diferentes maneiras de introduzir e controlar entradas externas de ar e ventilação e distribuição de ar em edificações comerciais, com impactos significativos na qualidade do ar interior (*indoor air quality - IAQ*) e no consumo energético. Sistemas típicos de aquecimento, ventilação e ar condicionado (AVAC, figura 1), atendem simultaneamente a entrada externa de ar com a climatização do ambiente. Estes sistemas AVAC unem ar externo e ar recirculante com o intuito de se obter uma boa mistura de ar no espaço climatizado. Uma maneira de atingir tal ventilação separa as funções de entrada de ar externo e climatização do ambiente e é denominada de DOAS (Dedicated outdoor air system, figura 2). (Emmerich, 2005)

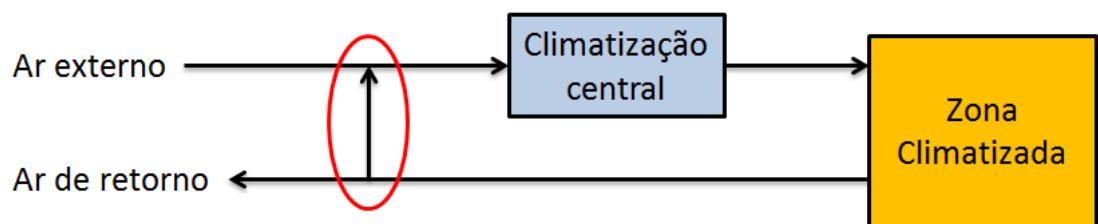


Figura 1 – Sistema de climatização convencional

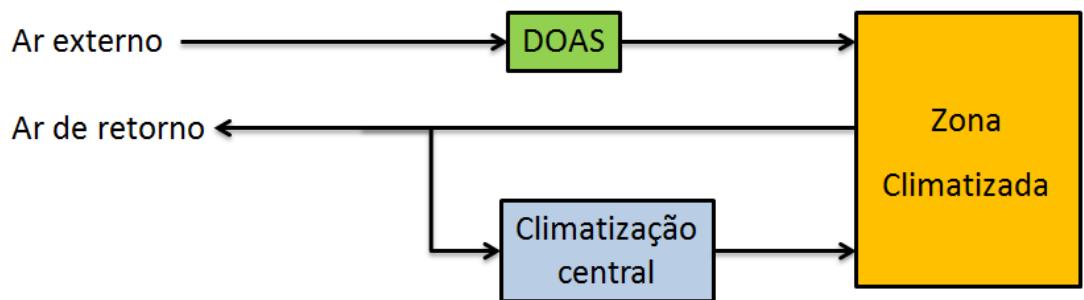


Figura 2 – Sistema de climatização com DOAS

O DOAS insufla ar externo tratado diretamente na zona climatizada, não havendo mistura com o ar de retorno. Responsável principalmente da carga latente, enquanto a climatização central fica responsável tanto pela carga sensível e latente.

Os artigos revisados utilizam o termo DOAS atrelado com sistemas de recuperação de calor, como roda entálpica. O caso estudado será apenas o sistema de tratamento de ar externo sem nenhuma recuperação de calor e utilizaremos o termo DOAS para apenas isto.

Data centers, ou centro de processamento de dados, são ambientes para abrigar computadores e equipamentos de tecnologia e com baixa densidade ocupacional. Esses têm sofrido grandes transformações nos últimos anos decorrentes de vários fatores, entre eles: aumento da capacidade computacional devido à evolução da tecnologia e dos materiais empregados na fabricação de computadores e servidores, aumento do número de dispositivos com conexão às redes de computadores e à internet, crescimento exponencial da utilização de “smartphones”, inclusão digital da população, surgimento da computação em nuvem e etc.

No Brasil, a grande maioria dos *data centers* está localizada no sudeste, com especial destaque para região metropolitana de São Paulo devido à concentração populacional, desenvolvimento econômico e existência da infraestrutura necessária, ou seja, logística e redes de comunicação de fibra ótica de alta velocidade e disponibilidade de energia elétrica.

Um *data center* pode consumir até 200 vezes mais energia elétrica que a mesma área correspondente a um escritório convencional. Por esse motivo torna-se um dos primeiros objetos de estudo em programas de eficiência energética. Entretanto, devido às suas características críticas de operação, que demandam alta disponibilidade e confiabilidade, os projetos de infraestrutura e as alternativas de aumento da eficiência energética devem ser cuidadosamente avaliados (Lintner et al, 2011)

Estudos realizados por Koomey (2007) mostraram que a potência instalada nos *data centers* no ano de 2005 foi de, aproximadamente, 5000 MW nos Estados Unidos e 14000 MW no mundo todo com uma perspectiva de crescimento anual de 14%. Uma revisão do estudo sobre o crescimento dos *data centers* Koomey (2011) mostrou que o rápido crescimento no consumo de energia elétrica ocorrido entre 2000 e 2005 sofreu uma queda no período entre 2005 e 2010 devido a vários fatores como a crise financeira mundial de 2008 e ao desenvolvimento de novas tecnologias como a virtualização de servidores. Em 2010 a potência instalada nos Estados Unidos e no mundo eram de aproximadamente 8750 MW e 27100 MW, respectivamente.

A figura 3 mostra uma projeção de densidade de potência para o ano de 2012 maior que 2kW/ft² (~21,53kW/m²) para servidores de processamento e equipamentos de comunicação, e, a partir de 1kW/ft² (~ 10,76kW/m²) para equipamentos de armazenamento. A projeção feita em 2005 foi alcançada e atualmente muitos *data centers* operam dentro da faixa de densidade projetada ou, em casos especiais, acima dela.

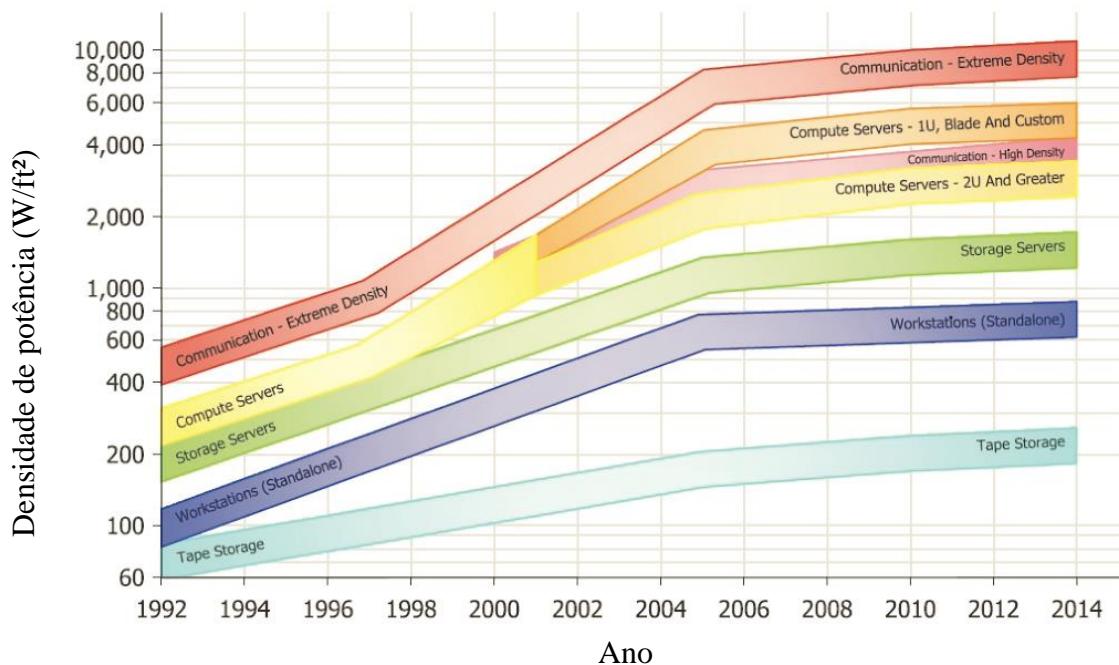


Figura 3 – Evolução da potência dos equipamentos de tecnologia da informação
(ASHRAE, 2011)

Em um típico *data center* o maior consumidor de energia elétrica são os próprios servidores. Logo em seguida, o sistema de climatização apresenta-se como o segundo maior consumidor. Diferentemente de outras instalações, os *data centers* têm uma carga térmica interna estável e, consequentemente, uma demanda do sistema de climatização com poucas variações durante todo o ano.

O sistema de climatização de maneira geral responde por um consumo de energia elétrica que pode variar de 30 a 45% em relação ao consumo de energia elétrica total. A figura 4 a seguir apresenta um gráfico típico do consumo de energia elétrica de um *data center* e seus principais consumidores. Em geral, o consumo de cada sistema varia de um *data center* para o outro devido à grande diversidade de soluções adotadas bem como a eficiência de cada equipamento, entretanto a figura é válida como uma referência inicial.

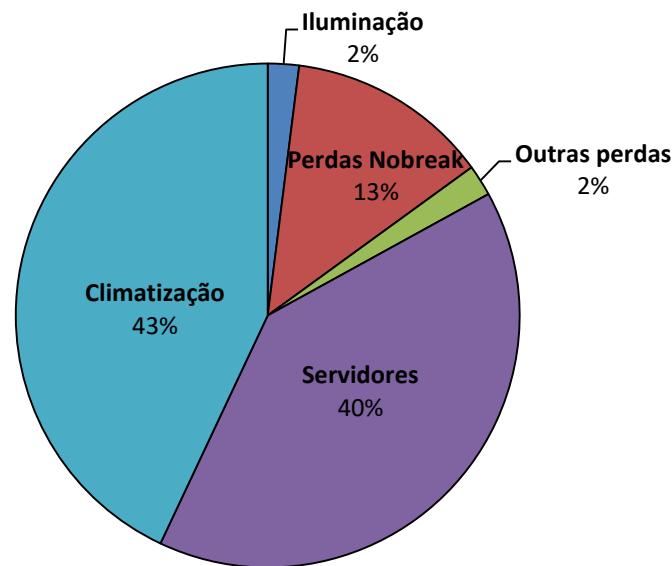


Figura 4 – Composição do consumo total de energia elétrica de um *data center* típico
(adaptado de Parker et al (2007))

Devido ao crescimento acelerado dos *data centers* e ao contínuo desenvolvimento da tecnologia da informação, bem como sua importância econômica e estratégica para as empresas, fez-se necessário o estabelecimento de normas e diretrizes.

Para a criação de diretrizes sobre os parâmetros ambientais recomendados durante a operação de equipamentos de tecnologia em um *data center* a *American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers* (ASHRAE) criou o Comitê Técnico 9.9 (*Technical Committee 9.9* ou TC 9.9), que é composto por membros representantes de vários fabricantes de equipamentos, engenheiros, consultores, operadores de *data center*, pesquisadores de universidades, laboratórios de testes, membros do governo dos EUA, etc. O objetivo do TC 9.9 é consolidar e compartilhar informações e diretrizes sobre *data centers*. O projeto inicial do TC 9.9 foi alinhar requisitos ambientais padronizados com os fabricantes de equipamentos, para tanto estes últimos tiveram uma grande representatividade nesta fase. Como resultado desse esforço várias diretrizes e normas puderam ser definidas e culminaram com a publicação de duas importantes referências “*Thermal Guidelines for Data Processing Environments*” e “*Datacom Equipment Power Trends and Cooling Application*” (ASHRAE, 2005). Um dos resultados do trabalho do TC 9.9 foi a definição de classes de operação baseadas em intervalos determinados de temperatura e umidade relativa. Essa definição possibilitou que os fabricantes de equipamentos de tecnologia classificassem os seus produtos de acordo com os intervalos de temperatura e umidade relativa recomendados para a operação. Dessa maneira pode-se estabelecer diferentes estratégias na operação de um *data center*. Em estratégias mais conservadoras a prioridade durante a operação é manter os limites dentro dos padrões recomendados com as mínimas variações de temperatura e umidade. Em estratégias que buscam uma maior eficiência energética e, consequente, economia de energia e redução de custo operacional, é aceitável que o *data center* seja submetido a maiores variações de temperatura e umidade.

2. OBJETIVOS

O objetivo deste trabalho é avaliar a eficiência energética de um sistema de climatização projetado para atender um *data center* e os potenciais benefícios e economias energética de um sistema de tratamento dedicado de ar externo (sigla em inglês, DOAS).

Averiguar principalmente se a economia energética prevista pelos artigos se dá devido à recuperação de calor ou pelo próprio DOAS.

2.1. Metodologia

Para isso, primeiro foi compilado informações sobre o sistema DOAS e feita uma revisão bibliográfica de literatura científica sobre o seu funcionamento e potencial impacto no consumo de energia em edificações.

Em seguida foi definido um modelo de *data center* como base para o trabalho (baseline). Um modelo foi construído utilizando-se a ferramenta Energy Plus com o objetivo de considerar características construtivas típicas de um *data center*. Realizou-se a implementação do DOAS no modelo base, e foi feita as simulações e análise dos resultados do desempenho da edificação com o sistema DOAS, inicialmente para a cidade de São Paulo.

Por último, foram feitas análises de parâmetros e condições de entrada como perfis climáticos, perfis ocupacionais e temperatura do ambiente climatizado desejada, avaliando diferentes casos e resultados.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. Análise de desempenho de sistemas dedicados de tratamento de ar externo (DOAS)

O trabalho de Emmerich (2005) é uma boa base para o presente trabalho, pois nele também foi feito um estudo do DOAS e uma simulação para uma edificação, tendo resultados bastante satisfatórios para os tipos de DOAS simulados. A economia de energia variou de 40% até 15%.

Mumma (2001) mostra três configurações diferentes para DOAS, comparando-as com um sistema de refrigeração Variable Air Volume (VAV) convencional, dando algumas recomendações.

Um artigo antigo defendendo a separação do ar externo do ar de recirculação foi escrito por Coad (1999). Ele argumenta que uma abordagem que combina ar exterior e ar de retorno para o condicionamento e circulação pode ter sido adequado para os edifícios mais simples e sistemas de climatização de décadas atrás.

Há dois trabalhos que servirão como base de comparação para o gráfico da matriz de consumo desagregado que obteremos com a simulação e seus autores são Parker; Hugh; Brown (2007) e H.S. Sun, S.E. Lee. (2006).

3.2. *Data Center*: características principais e índices de desempenho

3.2.1. Características principais

De Lima (2013) fez um estudo sobre a evolução e características de um *data center*. Algumas características diferenciam um *data center* de um ambiente de escritórios convencional, como por exemplo:

Ocupação e envoltória: Os principais ocupantes de um *data center* não são pessoas, portanto a carga associada ao perfil e variação de ocupação é diferente dos prédios comerciais. Há uma alta concentração de calor sensível e baixíssima concentração de calor latente. A carga térmica do ambiente é aproximadamente constante durante as 24 horas do dia visto que os servidores operam continuamente, o ambiente não tem janelas ou aberturas que recebam radiação solar e, por último, a carga térmica devido à dissipação de calor dos servidores é significativamente maior do que a carga térmica da envoltória.

Densidade de potência: *Data center* típicos possuem densidade entre 500 W/m² a 3000 W/m², podendo chegar em alguns casos a até 10000 W/m².

Opções de resfriamento: Os tipos de resfriamento e meios utilizados para transportar o calor dos componentes eletrônicos até o meio externo podem ser diferentes dos sistemas usados para conforto. E também a operação contínua durante o ano de altas cargas mudam as variáveis de projeto a serem consideradas nas diferentes zonas climáticas.

Atualização da tecnologia (Technology Refresh Rate): A frequência de atualização dos servidores pode variar de 2 a 5 anos enquanto a infraestrutura é projetada considerando-se uma vida útil aproximada de 20 anos. Portanto, a mesma infraestrutura terá que suportar várias gerações de equipamentos de tecnologia da informação.

Software e Hardware: Em um *data center*, os computadores são frequentemente chamados de ocupantes, pois representam o principal objetivo do projeto. No entanto, uma observação mais precisa revela que como os *softwares* (tipo de operação) são os responsáveis pela definição do *hardware*, eles são os verdadeiros “ocupantes” ou “usuários” do projeto. *Softwares*, em geral, são atualizados frequentemente. Nos últimos 12 anos, por exemplo, existiram 5 versões do sistema operacional Microsoft Windows (média de 1 versão a cada 2,5 anos). Em se tratando de aplicativos essa frequência pode ser ainda maior como o Adobe Acrobat que, nos últimos 19 anos, apresentou 10 versões, média de uma a cada 1,9 anos. O efeito prático é que cada mudança em software pode

demandar mudança nos requisitos do hardware e portanto mudança nos parâmetros de potência elétrica e refrigeração do *data center*.

A figura 5 apresenta o arranjo típico de um “*Data Center*” com alguns de seus componentes.

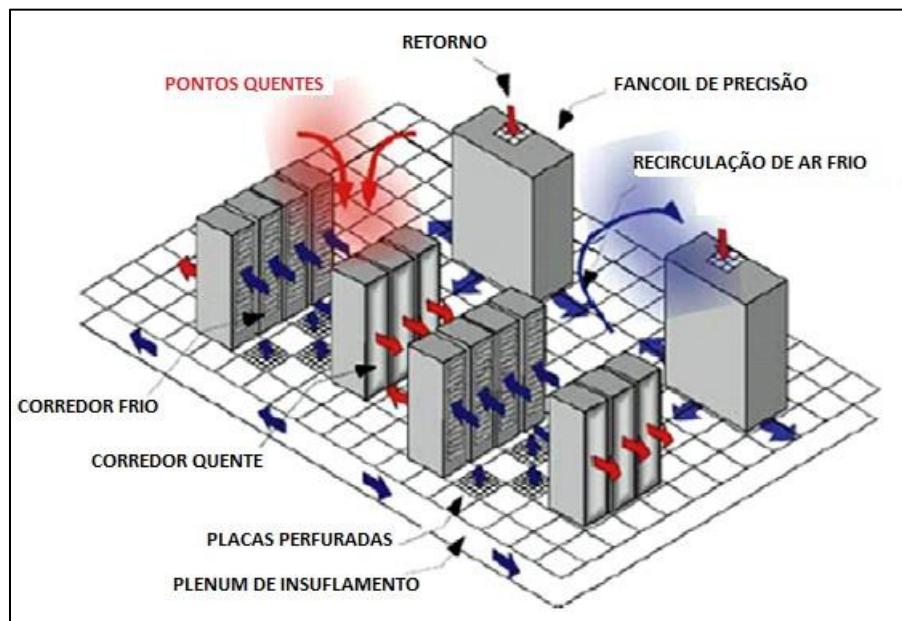


Figura 5 – Arranjo de um típico *data center* (López&Hamann (2011))

3.2.2. Normas Relacionadas ao Projeto e Operação de um *Data Center*

O Comitê Técnico 9.9 da ASHRAE criou as primeiras diretrizes para controle ambiental de *data centers* em 2004 (AHSRAE, 2011). Antes do estabelecimento dessas diretrizes os limites de operação de cada equipamento dependiam exclusivamente de cada fabricante. Com o passar do tempo a atenção para eficiência na operação foi aumentando e métricas como o PUE (que será detalhado no item 3.2.4) tornaram-se conhecidas e úteis para medir a eficiência de cada *data center*. Para melhorar o PUE várias soluções podem ser adotadas, incluindo-se a utilização de economizadores de ar e

água. Em 2008 o mesmo comitê publicou a segunda edição das diretrizes ambientais expandindo os limites de operação para que dessa maneira um maior número de localidades pudessem utilizar economizadores por um maior período de tempo durante a operação dos *data centers*.

Antes da publicação das normas e diretrizes ambientais algumas características podiam ser observadas com frequência nos *data centers* (ASHRAE, 2011):

- Antes da formação do TC 9.9 cada fabricante de equipamentos de TI publicava sua especificação de temperatura. *Data centers* típicos operavam em uma faixa de 20°C a 21°C com um senso comum de “quanto mais frio melhor”.
- *Data centers* adotavam equipamento de vários fabricantes diferentes, como consequência a temperatura ambiente deveria corresponder ao equipamento mais restritivo.
- TC 9.9 obteve inicialmente um consenso informal dos maiores fabricante de equipamentos de TI para os limites de temperatura e umidade “recomendados” e “permitidos” para 4 classes, sendo 2 classes aplicadas a *data centers*.
- Outra conquista do TC 9.9 foi estabelecer as entradas de ar dos equipamentos de TI como ponto padronizado para medição e aferição de temperatura e umidade.

O interesse geral no aumento dos limites de temperatura e umidade durante a operação cresceu motivado pelo desejo de se atingir uma maior eficiência operacional nos *data centers* e redução no custo total de propriedade (sigla em inglês, TCO). Em 2008, o TC 9.9 revisou os requisitos para as classes 1 e 2 deixando-os menos restritivos. A tabela 1 resume as recomendações para temperatura, umidade, ponto de orvalho e altitude.

Tabela 1– Diretrizes Térmicas ASHRAE 2008 (ASHRAE, 2011)

Classe	Especificação dos Ambientes dos Equipamentos									
	Em Operação ^{a,b}				Desligado ^{b,c}					
	Temperatura de Bulbo Seco (°C)	Variação de umidade, sem condensação	Máximo Ponto de Orvalho (°C)	Máxima Elevação (m)	Temperatura de Bulbo Seco (°C)	Umidade Relativa (%)	Máximo Ponto de Orvalho (°C)			
Permitido	Recomendado	Permitido (% RH)	Recomendado	Máximo Ponto de Orvalho (°C)	Máxima variação por hora (°C/h)	Temperatura de Bulbo Seco (°C)	Umidade Relativa (%)	Máximo Ponto de Orvalho (°C)		
1	15 a 32 ^d	18 a 27 ^e	20 a 80	5.5°C P.O. a 60% e 15°C PO	17	3050	5/20 ^f	5 a 45	8 a 80	27
2	10 a 35 ^d	18 a 27 ^e	20 a 80	5.5°C P.O. a 60% e 15°C PO	21	3050	5/20 ^f	5 a 45	8 a 80	27
3	5 a 35 ^{d,g}	NA	8 a 80	NA	28	3050	NA	5 a 45	8 a 80	29
4	5 a 40 ^{d,g}	NA	8 a 80	NA	28	3050	NA	5 a 45	8 a 80	29

a – equipamento ligado;

b – Fitas demandam um ambiente mais controlado (similar a Classe1). Requisitos típicos: temperatura mínima é 15°C, temperatura máxima é 32°C, umidade relativa mínima é 20%, umidade relativa máxima é 80%, ponto de orvalho máximo 22°C, variação de temperatura menor que 5°C/h, variação de umidade menor que 5% por hora, sem condensação.

c – o equipamento foi removido da embalagem, instalado, mas não está em uso ou foi desligado para manutenção ou atualização.

d – Subtrair a máxima temperatura de bulbo seco permitida em 1°C/300m acima de 900m.

e – Subtrair a máxima temperatura de bulbo seco recomendada em 1°C/300m acima de 1800m.

f – 5°C/hr para *data centers* utilizando fitas e 20°C/h para *data centers* utilizando discos.

g – Com utilização de disquete, a temperatura mínima é 10°C.

PO – Ponto de Orvalho.

Aumentando-se a variação de temperatura e umidade aumenta-se também a oportunidade de redução de consumo energético. Geralmente equipamentos projetados para *data centers* atendem os requisitos das classes 1 e 2. As definições de limites recomendados e limites permitidos garantem uma maior flexibilidade e possibilitam que os *data centers* tenham diferentes estratégias de operação. Os *data centers* projetados com prioridade em confiabilidade vão operar dentro dos limites recomendados da classe 1 em intervalos menores de variação de temperatura e umidade. Já aqueles onde a eficiência energética tem maior relevância, vão operar a maior parte do tempo dentro

dos limites recomendados da classe 2 e também parte do tempo dentro dos limites permitidos sem prejuízo ou danos aos equipamentos de TI. É importante ressaltar que essa é uma decisão importante de projeto, pois a escolha inadvertida de equipamentos para operar em maiores limites de temperatura e umidade buscando maior eficiência energética pode impactar significativamente nos custos dos equipamentos, e, portanto, no investimento inicial do projeto. Para operar em temperatura e umidade mais altas é necessária uma maior área de troca de calor, aumento da vazão de ar, aumento do ventilador do servidor, aumento do tamanho do equipamento, etc, impactando diretamente no preço de climatização. (ASHRAE, 2011)

Tabela 2 – Diretrizes Térmicas ASHRAE 2011 (ASHRAE, 2011)

Classes	Especificações dos Ambientes dos Equipamentos							
	Equipamento Ligado					Equipamento Desligado		
	Temperatura de Bulbo Seco (°C)	Variação de Umidade	Max Ponto de Orvalho (°C)	Elevação Máxima (m)	Variação Máxima (°C/h)	Temp Bulbo Seco (°C)	Umidade Relativa (%)	Máximo Ponto de Orvalho (°C)
Recomendado								
A1 – A4	18 a 27	5.5°C PO a 60% UR e 15°C PO						
Permitido								
A1	15 a 32	20% a 80% UR	17	3050	5/20	5 a 45	8 a 80	27
A2	10 a 35	20% a 80% UR	21	3050	5/20	5 a 45	8 a 80	27
A3	5 a 40	-12°C PO e 8% a 85% UR	24	3050	5/20	5 a 45	8 a 80	27
A4	5 a 45	-12°C PO e 8% a 90% UR	24	3050	5/20	5 a 45	8 a 80	27
B	5 a 35	8% a 80% UR	28	3050	NA	5 a 45	8 a 80	29
C	5 a 40	8% a 80% UR	28	3050	NA	5 a 45	8 a 80	29

As novas diretrizes, tabela 2, foram desenvolvidas com o objetivo de fornecer o máximo de informações possível ao operador do *data center* para permitir que este opere

da maneira mais eficiente e ainda mantenha a confiabilidade requerida pelo tipo de aplicação. Duas novas classes de *data center* foram criadas para atingir uma maior flexibilidade na operação do *data center*. As quatro classes de *data center* incluindo as duas novas (A3 e A4) são ilustradas na carta psicrométrica abaixo (figura 6).

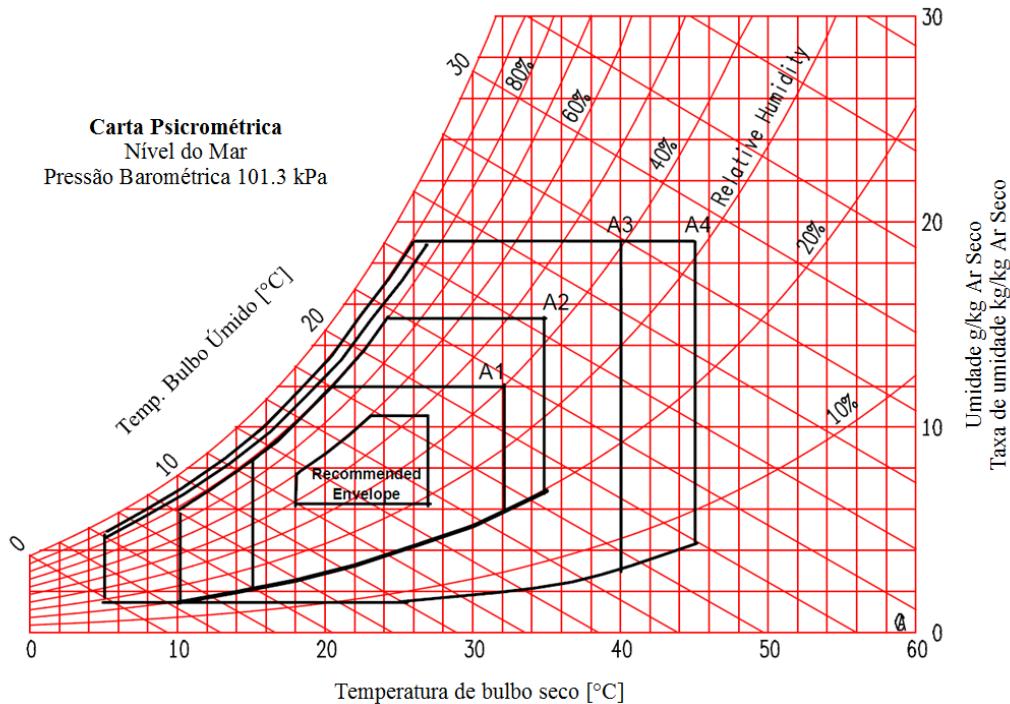


Figura 6 – Classes ambientais da ASHRAE para *Data Centers* (ASHRAE, 2011)

As classes A3 e A4 da ASHRAE foram criadas para expandir os limites ambientais para os equipamentos de TI. As Classes A1, A2, B e C são idênticas às Classes 1, 2, 3 e 4 da edição de 2008. O objetivo da criação dos limites recomendados é proporcionar uma operação priorizando-se a máxima confiabilidade dos equipamentos de TI, colocando-se a eficiência energética em um segundo plano. O objetivo nunca foi fixar os limites recomendados como valores intransponíveis de condições ambientais. Como afirmado em “*Thermal Guidelines*”, “os limites recomendados definem o limite abaixo do qual os equipamentos de TI operariam com a mais alta confiabilidade e ainda com uma eficiência energética razoável”. Na mesma referência também se afirma que é “aceitável operar fora dos limites recomendados por pequenos períodos de tempo sem

que a operação e confiabilidade dos equipamentos de TI sejam afetadas”. Entretanto, os limites recomendados ainda são considerados por muitos como obrigatórios, mesmo que esse nunca tenha sido o objetivo proposto pela ASHRAE (ASHRAE, 2011)

A tabela 3 ilustra as diferenças entre a primeira versão publicada em 2004 e a versão publicada em 2008.

Tabela 3 – Comparação entre as versões de 2004 e 2008 para limites recomendados

	2004	2008
Temperatura mínima	20°C	18°C
Temperatura máxima	25°C	27°C
Umidade mínima	40% RH	5,5°C PO*
Umidade máxima	55% RH	60% e 15°C PO*

*P.O. – Ponto de Orvalho

3.2.3. Principais Tipos de *Data Center*

Neste item serão apresentados os principais tipos de configuração de *data centers* (ASHRAE, 2011).

A figura 7 apresenta uma sala de servidores com insuflamento de ar frio pelo piso elevado, arranjo de corredores do tipo quente e frio e retorno aberto para as unidades de resfriamento, ou *Computer Room Air Conditioner* (CRAC), que estão dentro da sala. Esse tipo de configuração é frequentemente adotado em projetos cuja otimização da utilização do espaço físico é uma prioridade, pois os CRAC’s e também painéis elétricos de distribuição de energia, *Power Distribution Units* (PDU) e *Remote Power Panels* (RPP) estão no mesmo ambiente dos servidores. A utilização de insuflamento pelo piso elevado é adotada amplamente com a justificativa de se possuir um único *plenum* com pressão constante concentrando o insuflamento de todos os

CRAC's (operantes e reservas), que permite o ajuste da vazão necessária para cada rack pela grelha de insuflamento localizada imediatamente à frente e proporciona uma menor perda de carga possibilitando maior economia de energia dos ventiladores.

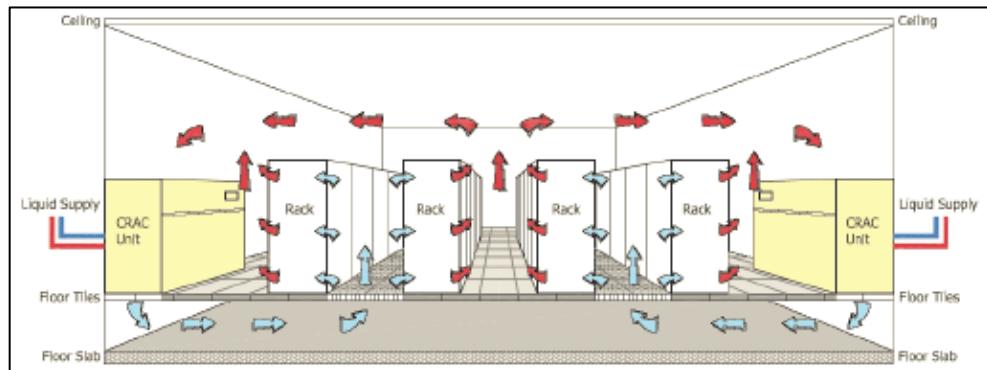


Figura 7 - Resfriamento utilizando piso elevado e corredores quentes e frios (ASHRAE, 2011)

A figura 8 apresenta uma sala de servidores com insuflamento de ar frio pelo piso elevado, arranjo de corredores do tipo quente e frio, retorno pelo plenum sobre o forro e CRAC's localizadas em um corredor técnico em torno da sala de servidores. Essa configuração é adotada em projetos onde se busca o total isolamento dos servidores, pois os CRACs, PDUs, RPPs e quadros elétricos localizam-se no corredor técnico e toda a atividade de operação e manutenção desses equipamentos é isolada da sala de servidores, cujo acesso fica restrito a um menor número de pessoas aumentando a segurança do ambiente.

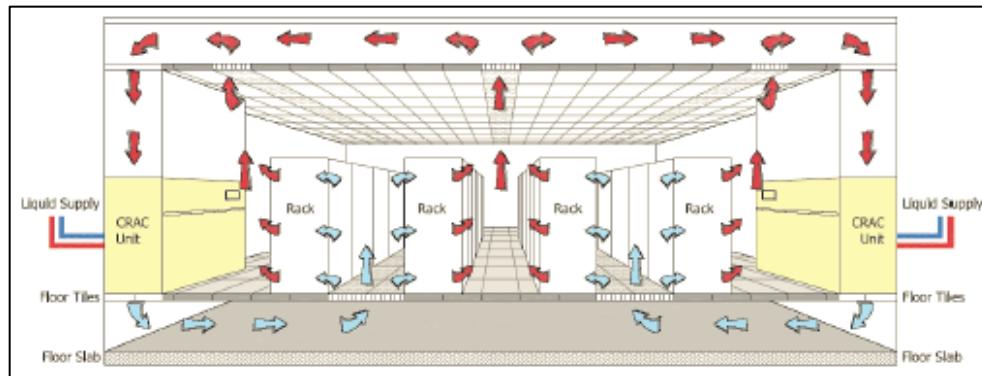


Figura 8 - Resfriamento utilizando piso elevado e corredores quentes e frios com equipamentos de infraestrutura elétrica e mecânica localizados fora da sala de servidores
(ASHRAE, 2011)

A figura 9 apresenta uma sala de servidores com insuflamento pelo piso elevado, arranjo de corredores do tipo quente e frio com insuflamento e retorno do ar dutados. Essa configuração é adotada quando a sala de servidores utiliza o ar condicionado de um sistema central ou quando não é possível a instalação dos CRACs em um ambiente próximo ou dentro da sala de servidores. A desvantagem é o a utilização de dutos que imprimem uma perda de carga maior na circulação do ar e consequentemente aumenta o consumo de energia por parte dos ventiladores.

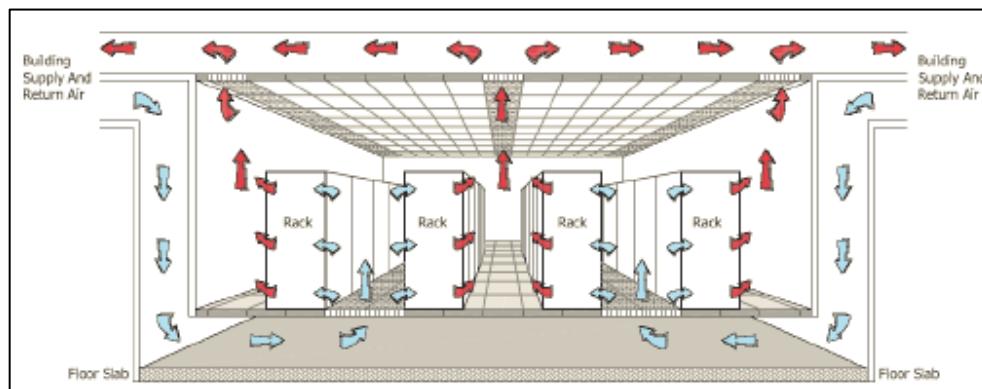


Figura 9 – Resfriamento utilizando piso elevado e corredores quentes e frios com insuflamento e retorno dutados (ASHRAE, 2011)

A figura 10 apresenta uma sala de servidores com insuflamento pelo piso elevado, arranjo de corredores do tipo quente e frio com os CRACs localizados em um pavimento abaixo do piso elevado. Essa configuração é encontrada com pouca frequência, devido à necessidade de maior espaço físico e à construção de uma laje adicional, porém apresenta uma menor perda de carga no insuflamento do ar.

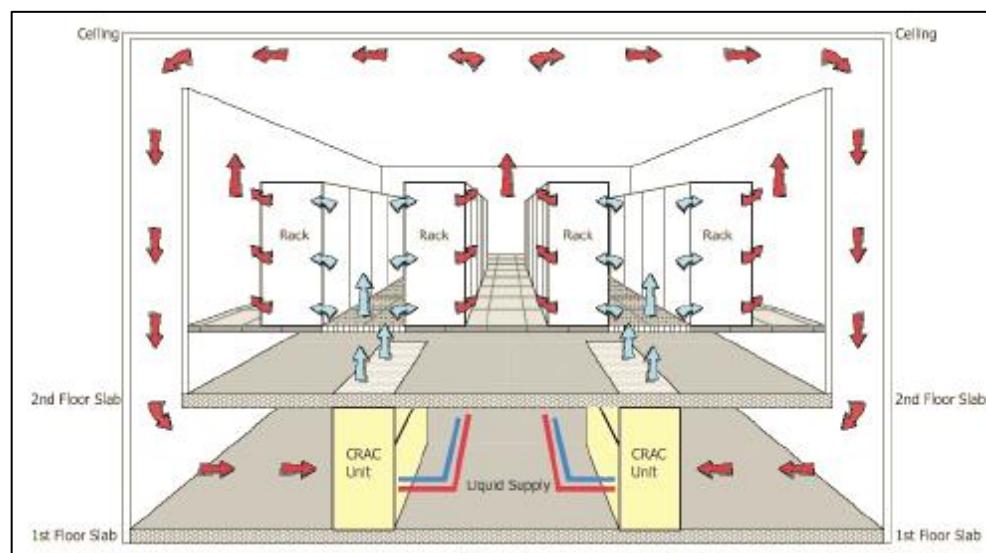


Figura 10 – Resfriamento utilizando piso elevado com corredores quentes e frios
(ASHRAE, 2011)

A figura 11 apresenta uma configuração que utiliza a distribuição dos racks em corredores quentes e frios, porém sem a adoção de insuflamento sob o piso elevado. O insuflamento do ar frio é feito por dutos aéreos, solução normalmente encontrada em escritórios comerciais. A vantagem dessa solução em comparação ao insuflamento de ar pelo piso elevado é a redução de custo na fase de construção e a ausência da necessidade de se garantir a estanqueidade do piso elevado.

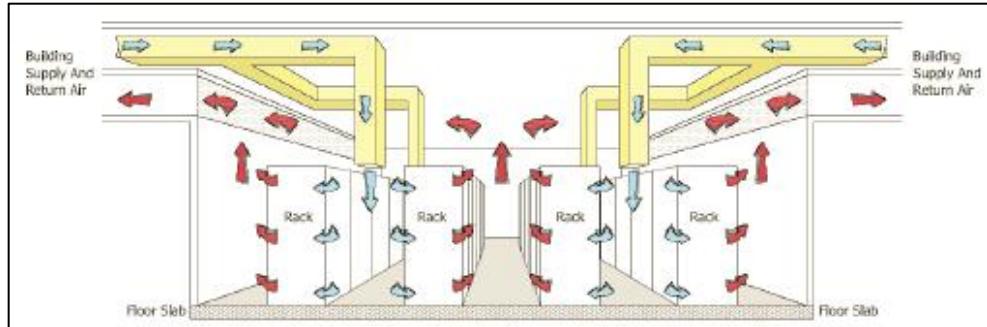


Figura 11 – Insuflamento dutado pelo forro (ASHRAE, 2011)

3.2.4. Métodos para Avaliação do Desempenho de um *Data Center*

Ao longo do tempo várias instituições como *The Uptime Institute*, *Lawrence Berkley National Labs (LBNL)* e *The Green Grid* vêm criando métricas para avaliação do desempenho energético dos *data centers*, entre as métricas mais utilizadas podemos citar as seguintes (Lintner et al, 2011):

3.2.4.1. PUE e DCiE

O PUE (*Power Usage Effectiveness*) é definido como a relação entre a potência total (infraestrutura + equipamentos de TI) necessária para operar o *data center* e a potência consumida pelos equipamentos de TI, sendo utilizado principalmente nos EUA.

$$PUE = \frac{\text{Potência Total Consumida}}{\text{Potência dos Equipamentos de TI}}$$

O Departamento de Energia dos Estados Unidos (sigla em inglês, DOE), através de estudos realizados por vários programas, classificou a eficiência dos *data centers* conforme a tabela abaixo.

Tabela 4 – Classificação da eficiência de um *data center* baseada no PUE

Regular	Bom	Excelente
2	1,4	1,1

Outro índice utilizado é o DCiE (*Data Center Infrastructure Efficiency*) que é definido como a relação entre a potência consumida pelos equipamentos de TI e a potência total necessária para operar o *data center*. Com esta definição, ele é o valor inverso do PUE e é utilizado principalmente na Europa.

$$DCiE = \frac{1}{PUE} = \frac{Pot\acute{e}ncia\ dos\ Equipamentos\ de\ TI}{Pot\acute{e}ncia\ Total\ Consumida}$$

De maneira análoga tem-se uma tabela de classificação do *data centers* de acordo com sua eficiência.

Tabela 5 – Classificação da eficiência de um *data center* baseada no DCiE

Regular	Bom	Excelente
0,5	0,7	0,9

É importante notar que as duas métricas (PUE e DCiE) não definem uma eficiência global do *data center*. Essas métricas poderiam ser definidas utilizando uma média anual de potência ou energia (kWh) ao invés de demanda instantânea de potência. A vantagem da utilização de medições anualizadas seria a contabilização da economia proporcionada por soluções para redução do consumo de energia elétrica como “free cooling”, servidores com ventiladores de rotação variável e virtualização.

3.2.4.2. Rack Cooling Index (RCI) e Return Temperature Index (RTI)

O RCI mede a efetividade do resfriamento de cada rack de acordo com as recomendações de temperatura de entrada estabelecidas pela ASHRAE/NEBS. Utilizando-se a diferença entre temperatura recomendada e permitida da ASHRAE Class1 (2008), os limites máximos (RCI_{HI}) e mínimos (RCI_{LO}) são definidos como se segue:

$$RCI_{HI} = \left[1 - \frac{\sum_{T_x > 27} (T_x - 27)}{(32 - 27) \times n} \right] \times 100[\%]$$

$$RCI_{LO} = \left[1 - \frac{\sum_{T_x < 18} (18 - T_x)}{(18 - 15) \times n} \right] \times 100[\%]$$

onde,

T_x = Temperatura média na entrada de ar do equipamento;

n = Número total de entradas;

$RCI = 100\%$ representa as condições ideais para o equipamento, a temperatura não excede o limite inferior nem o superior recomendado pela ASHRAE.

$RCI < 90\%$ é considerado insatisfatório.

O RTI avalia o desempenho do sistema de gerenciamento de ar e é definido como:

$$RTI = \frac{\Delta T_{AHU}}{\Delta T_{EQUIP}} \times 100\%$$

onde,

ΔT_{AHU} = diferencial de temperatura do fancoil.

ΔT_{EQUIP} = aumento de temperatura do servidor.

Valores de RTI diferentes de 100% indicam perdas no sistema de ar condicionado. Valores acima de 100% indicam recirculação de ar quente que pode resultar em “hot spots”, isto é, pontos localizados de alta temperatura e também aumentar a temperatura de retorno do ar. Valores menores que 100% indicam *by-pass* de ar frio, isto é, o ar frio não resfria os servidores passando direto para o retorno, portanto, reduzindo a temperatura de retorno do ar. Portanto um RTI de 100% deve ser a meta de um sistema de ar condicionado eficiente.

A elevação da temperatura do ar (ΔT) através de um servidor pode variar de 10°F (5,5°C) a mais de 40°F (22,2°C). O ΔT do equipamento utilizado no cálculo do RTI é uma média ponderada do escoamento do ar. Fazer a medição precisa da elevação de temperatura através de todos os servidores em um data center pode ser um desafio e muitas vezes impraticável.

Os parâmetros RCI e RTI fornecem um método objetivo para a medição do desempenho do sistema de climatização de um *data center*. Eles devem ser usados em conjunto para garantir o melhor projeto possível. A diferença de temperatura entre o retorno e o insuflamento do ar, conhecida como “ ΔT do ar”, é normalmente usada como métrica de eficiência do sistema de climatização. O RTI é um indicador mais adequado da eficiência do sistema de climatização, pois considera o diferencial de temperatura nos servidores, que pode variar de 10°F (5,5 °C) a 40°F (22,2 °C) dependendo da carga do servidor, e também o diferencial de temperatura nos *fancoils*. Entretanto, o ΔT do ar pode fornecer uma referência em termos de carga a ser instalada nos *racks*. Quanto maior a potência instalada em um *rack*, maior será o ΔT do equipamento de TI e, portanto, pode-se projetar o sistema com um ΔT do ar maior para redução do consumo de energia nos ventiladores.

3.2.4.3. Eficiência do Escoamento de Ar

Esta métrica caracteriza a eficiência geral do escoamento do ar em uma relação entre potência consumida pelos ventiladores e vazão de ar. Fornece uma medida de quão eficiente o ar se move através do *data center* desde o insuflamento até o retorno do ar, considerando indiretamente a perda de pressão e eficiência dos ventiladores.

$$\frac{\text{Potência Total de Ventilador (W)}}{\text{Fluxo total de ar (cfm)}}$$

Os valores de referência para essa métrica são mostrados na tabela abaixo:

Tabela 6 – Classificação da eficiência de um *data center* baseada no DCiE

Regular	Bom	Excelente
1,25 W/cfm	0,75 W/cfm	0,5 W/cfm

4. SIMULAÇÃO

4.1. MATERIAIS E MÉTODOS

Foram utilizados os *softwares* EnergyPlus Versão 8.3, SketchUp, com o *plug in* OpenStudio para as simulações.

O *software* EnergyPlus é um programa de simulação de energia usado por engenheiros, arquitetos e pesquisadores para mensurar ambos consumo energético – para aquecimento, refrigeração, ventilação e iluminação – e consumo de água. Também é desenvolvido e patrocinado pelo Departamento de Energia dos Estados Unidos.

O EnergyPlus fornece arquivos de simulação nos quais podem ser encontrados sistemas já configurados, incluindo um sistema central de climatização com e sem tratamento de ar externo dedicado.

Para a simulação foi feito então um modelo de referência que será detalhado no item 4.2 para ser implementado o sistema de tratamento de ar externo DOAS.

4.2. MODELO DA EDIFICAÇÃO

Um modelo de uma edificação de referência com perfil típico de *data center* foi definida para a realização das simulações. Esta edificação tem um andar cujas dimensões laterais são 42m e 48m , totalizando 2016 m² de área. O modelo tem 3 metros de pé direito, com insuflamento realizado por meio de dutos pelo forro. Além disso, há uma área central retangular com 8,4m e 6m de lado. As características da envoltória da edificação foram definidas com base nas premissas da norma ASHRAE 90.1 (ASHRAE, 2001), sendo que a representação do modelo na ferramenta SketchUp é apresentada na Figura 12.

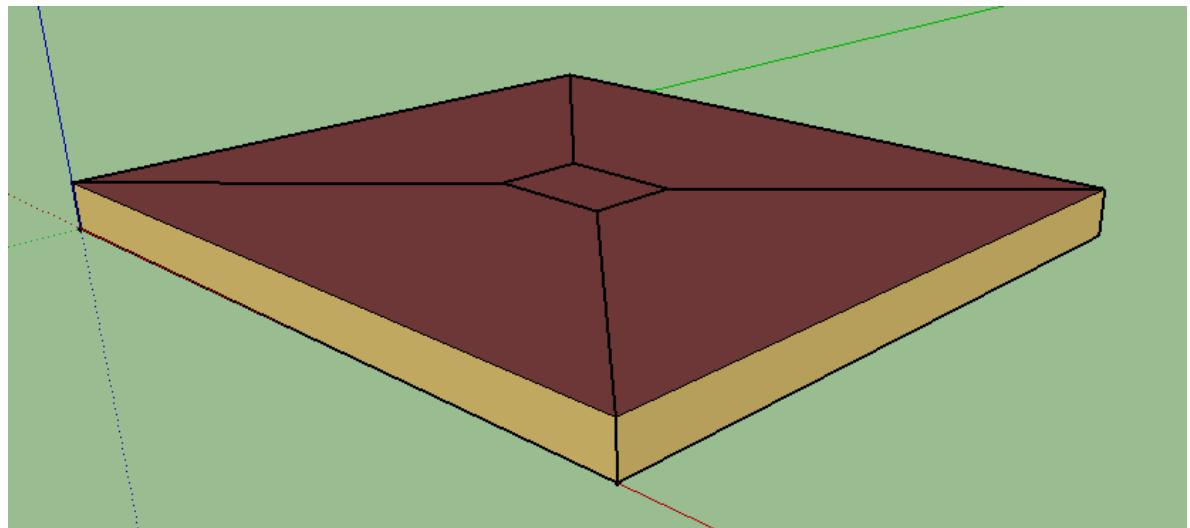


Figura 12 - Modelo do *data center* no SketchUp

Devido a uma limitação da ferramenta Energy Plus, a parte majoritária do *data center* foi dividida em quatro zonas, porém na edificação real não há divisão física entre elas. Do ponto de vista de balanço energético, esta divisão não afetará os resultados finais.

A potência dos equipamentos de TI foi estipulado em 190 kW por zona, ou seja, 760 kW no total. Esse número foi calculado proporcionalmente à área do modelo, sendo baseado num *data center* real localizado em Mogi Mirim do Itaú-Unibanco, sendo que este possui uma área de 5300 m² e uma potência de 2000 kW, preparado a suportar até 7000 kW.

Utilizando a norma NBR 16401 (2008) foram definidos diversos parâmetros. A ocupação para *data center* de 4 pessoas a cada 100m². A taxa de iluminação considerada na sala de servidores e corredores técnicos foi de 16 W/m². A vazão de ar externo definida na norma é de 3,8 l/s por pessoa e 0,5 l/s.m². Foi considerado também 200 kW como perdas, resistências e utilidades em geral.

4.3. SIMULAÇÃO DA EDIFICAÇÃO REFERÊNCIA SEM E COM DOAS

A partir das simulações foi possível obter as matrizes de consumo desagregado para a edificação de referência com sistema de climatização convencional e para a edificação com a estratégia DOAS aplicada.

4.3.1. Resultados da simulação para a edificação de referência

A temperatura média do ambiente climatizado será de 24 °C. Será utilizado o arquivo de climatização central do EnergyPlus para a simulação. A Tabela 7 mostra o consumo anual de energia da edificação de referência utilizando os dados climáticos da cidade de São Paulo separados em climatização, iluminação, equipamentos de TI e outros (perdas). O gráfico 1 ilustra a contribuição de cada um desses fatores em porcentagem em relação ao consumo total da edificação.

Tabela 7 – Consumo anual de energia da edificação de referência

	Electricidade [MWh]
Resfriamento	7.053
Iluminação	283
Equipamentos de TI	6.658
Outros	1.752
Ventilação	68
Bombas	256
Rejeição de Calor	86
TOTAL	16.155

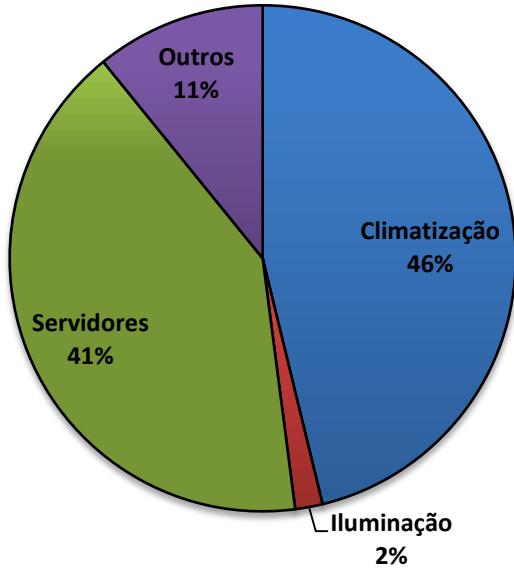


Gráfico 1 - Matriz de consumo desagregado da edificação de referência na cidade de São Paulo

A matriz de consumo desagregado obtida é conforme a literatura analisada comparando com a figura 4.

4.3.2. Resultado da simulação com DOAS

A tabela 8 mostra o consumo anual de energia do modelo simulado com DOAS implantado e simulado para as condições climáticas de São Paulo, variando o valor de temperaturas de entrada de ar de renovação externo.

Tabela 8 - Consumo anual de energia da edificação com DOAS para diferentes temperaturas de entrada de ar externo para renovação.

Temperatura de entrada de ar externo para renovação	Eletroicidade [MWh]						Referência (sem DOAS)
	12,8 °C	16 °C	20 °C	24 °C	28 °C		
Resfriamento	7.072	7.061	7.047	7.035	7.003	7.053	
Illuminação	283	283	283	283	283	283	
Equipamentos de TI	6.658	6.658	6.658	6.658	6.658	6.658	6.658
Outros	1.752	1.752	1.752	1.752	1.752	1.752	
Ventilação	81	81	81	81	81	68	
Bombas	260	259	257	256	252	256	
Rejeição de Calor	86	86	86	86	85	86	
TOTAL	16.192	16.179	16.164	16.150	16.114	16.155	

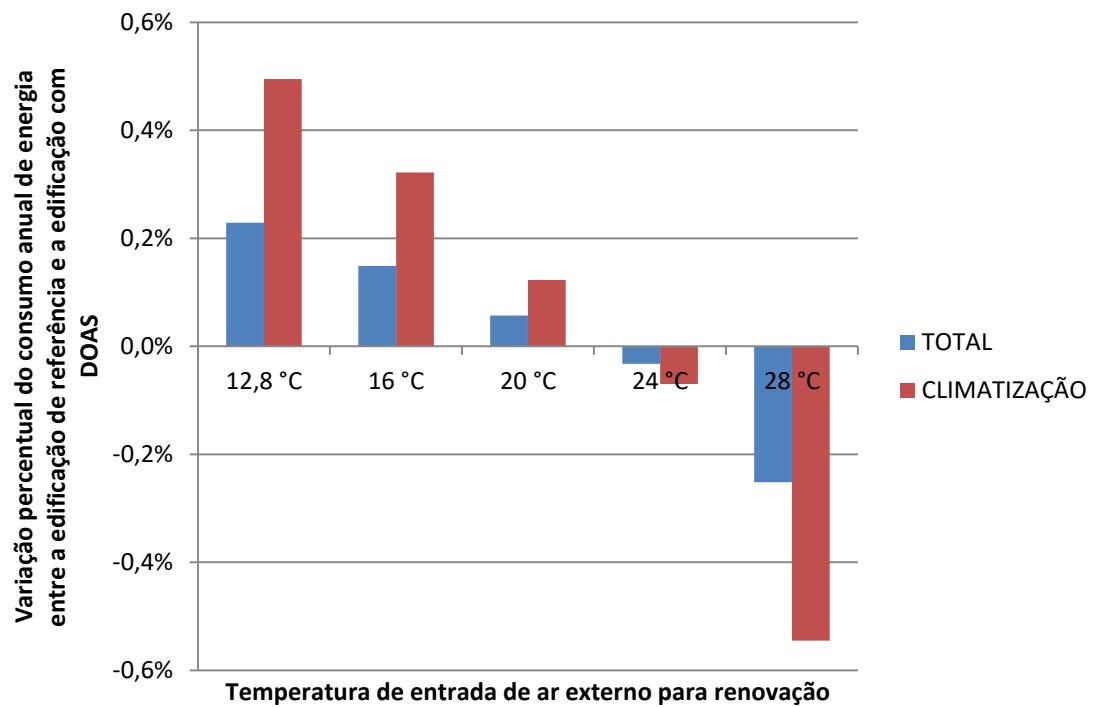


Gráfico 2 – Variação percentual do consumo anual de energia entre a edificação de referência e a edificação com DOAS

Ao analisar o gráfico 2 nota-se que não há redução significativa de consumo anual de energia com a implementação do DOAS para o clima de São Paulo com o perfil de ocupação de um *data center* (redução máxima de 0,6%). As duas hipóteses para a baixa redução de consumo energético são a baixa ocupação e o clima desfavorável. Foram feitas mais simulações para averiguar essas hipóteses levantadas e os resultados são apresentados no item 4.4.

4.4. SIMULAÇÃO MENSAL PARA DIFERENTES CLIMAS BRASILEIROS

Para averiguar se havia uma grande redução compensada por um grande aumento do consumo energético durante diferentes meses do ano foram realizadas simulações mensais para São Paulo, Curitiba e Chicago. Também podemos averiguar se para climas mais frios como de Curitiba e Chicago há uma redução de consumo energético com a estratégia DOAS. Os resultados são apresentados nos gráficos 3, 4 e 5 comparam o consumo energético do *data center* com o DOAS com setpoint de temperatura de 24 °C em relação ao baseline.

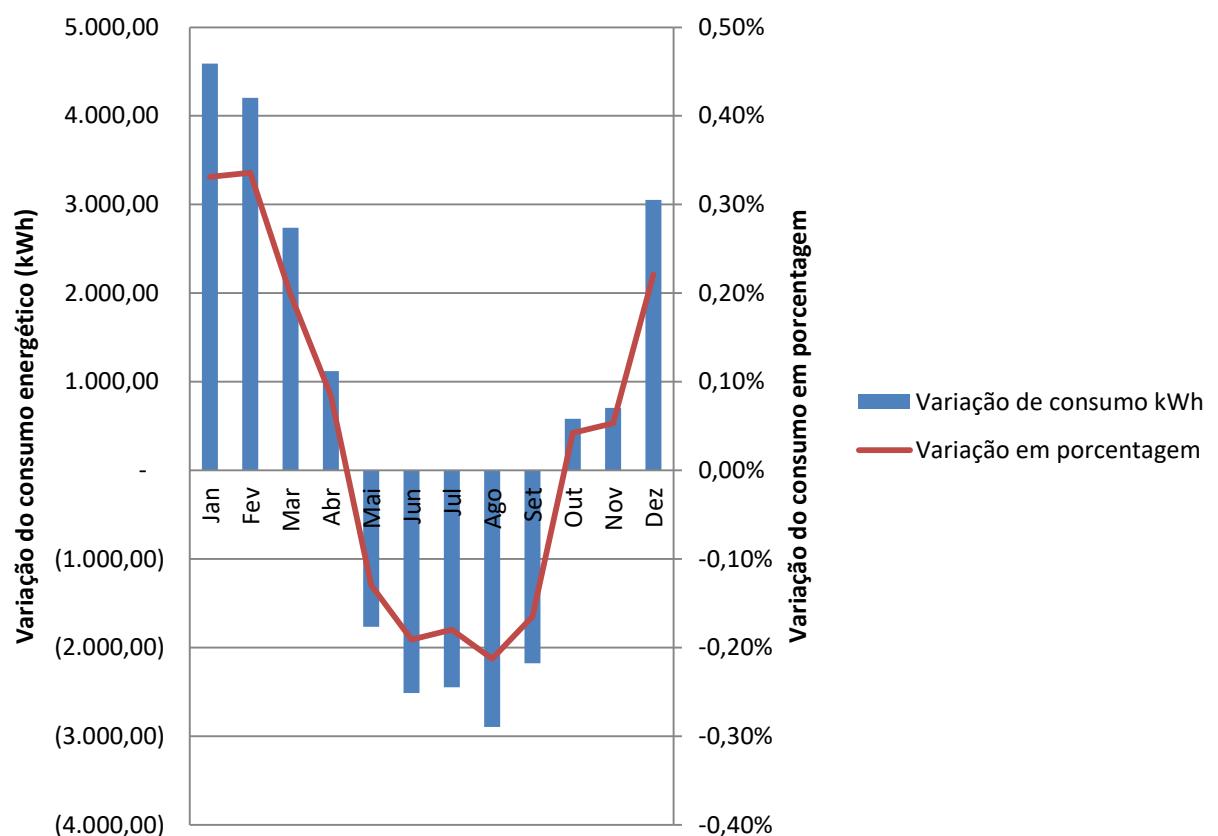
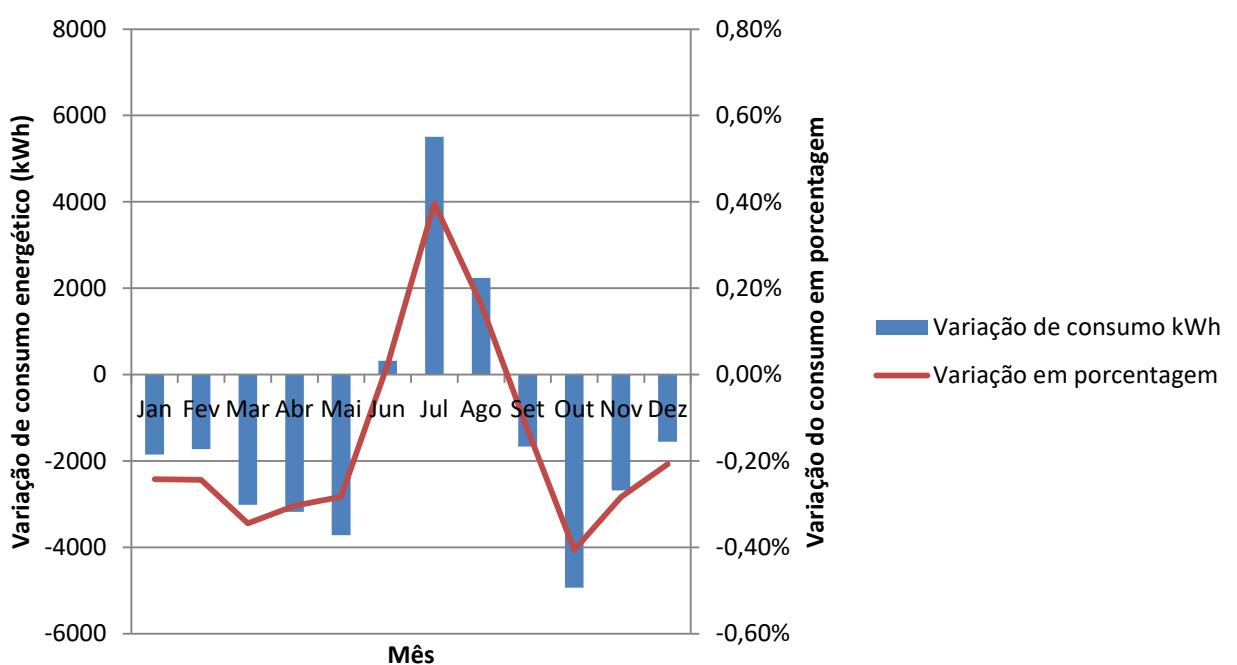
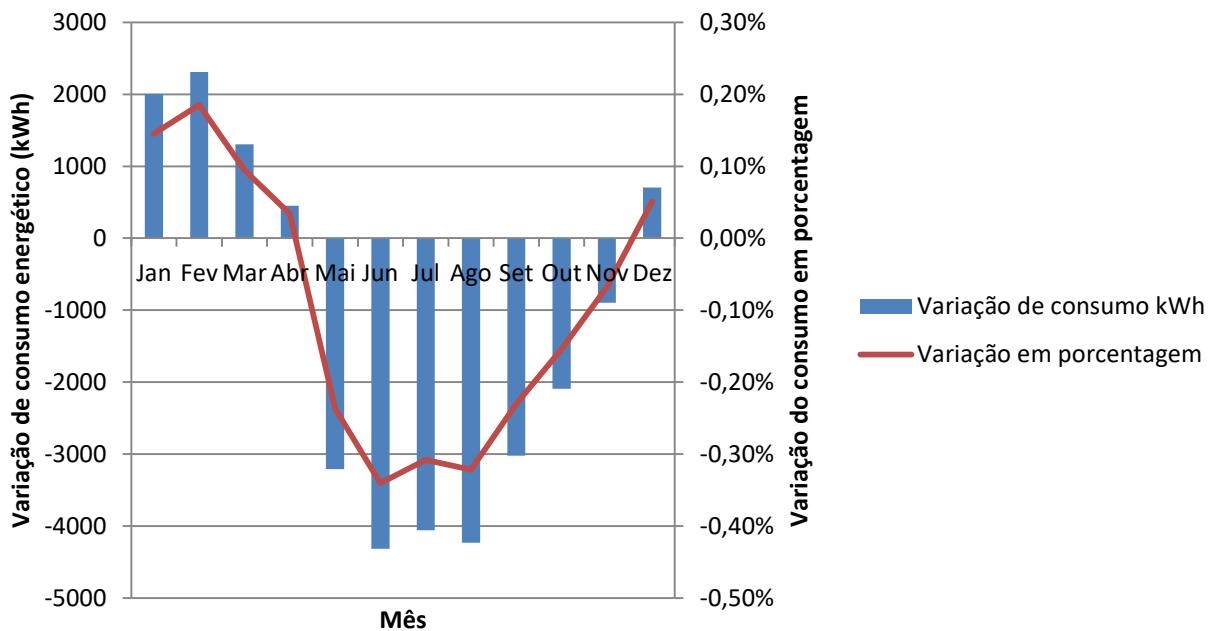


Gráfico 3 - Variação do consumo energético mensal (São Paulo)



Podemos observar que mesmo com uma mudança para o clima mais frio de Chicago não há redução significativa de gasto energético, redução máxima de 0,4%. Não há uma grande redução de gasto energético compensada por um grande aumento, a diferença de gasto energético é sempre pequena percentualmente.

4.5. SIMULAÇÃO COM DIFERENTES PERFIS DE OCUPAÇÃO

Foram realizadas simulações alterando valores de ocupação média, equipamentos elétricos, vazão de ar externo para perfis que simulem um escritório e um call center. Por estes terem um perfil de ocupação maior espera-se uma redução mais significativa no consumo energético. As características destes ambientes segue na tabela 9 abaixo:

Tabela 9 – Características dos ambientes simulados

	<i>Data Center</i>	Escritório de alta densidade	Call Center
Ocupação [pessoas/m ²]	0,04	0,2	0,6
Iluminação [W/m ²]	16	12	12
Equipamento Elétrico [kW]	760	200	200
Perdas e outros gastos energéticos [kW]	200	0	0
Vazão de ar externo por pessoa [m ³ /s.pessoa]	0,0038	0,0038	0,0057
Vazão de ar externo por área [m ³ /s.m ²]	0,0005	0,0005	0,0009

Comparando para os dois ambientes simulados os sistemas sem DOAS e com DOAS para diferentes setpoints de ar externo obtemos o gráfico 6.

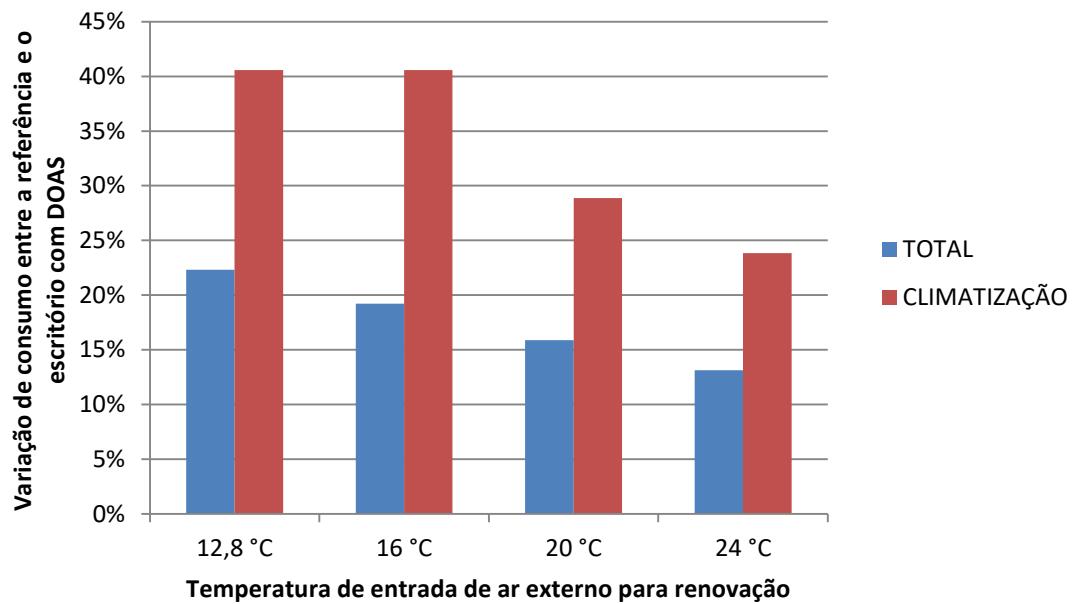


Gráfico 6 – Variação de consumo anual de energia da edificação com sistema DOAS em relação a edificação de referência para um escritório de alta densidade para a cidade de São Paulo

Pode-se observar que para outros perfis de ocupação mais densos não houve melhoria na redução do consumo energético com a implantação do DOAS.

4.6. SIMULAÇÕES FINAIS

Para averiguar a influência do coeficiente de performance (COP) foram feitas simulações alterando este para o valor de 3,2. Os resultados estão apresentados na tabela 10 e mostram que não há redução de consumo energético alterando esse parâmetro.

Tabela 10 - Consumo anual de energia da edificação com DOAS para diferentes temperaturas de entrada de ar externo para renovação. (COP = 3,2)

Temperatura de entrada de ar externo para renovação	Eletroicidade [MWh]		
	12,8 °C	14 °C	Referência (sem DOAS)
Resfriamento	2.211	2.209	2.204
Iluminação	283	283	283
Equipamentos de TI	6.658	6.658	6.658
Outros	1.752	1.752	1.752
Ventilação	81	81	68
Bombas	197	197	194
Rejeição de Calor	56	56	56
TOTAL	11.236	11.235	11.214

5. CONCLUSÃO

Ao analisar o gráfico 2 nota-se que não há redução significativa de consumo energético com a implementação do DOAS.

Os gráficos 3, 4 e 5 mostram que mesmo para climas mais frios como de Curitiba e Chicago não há redução de consumo energético implementando a estratégia DOAS. Por mostrarem a diferença de consumo energético mensalmente também descartam a possibilidade de ser ter uma redução de consumo significativo compensada por um aumento de consumo de mesma ordem de grandeza.

O gráfico 6 mostra que com maiores ocupações os resultados são ainda piores, com aumento de consumo energético. As simulações finais mostradas na tabela 10 alterando o coeficiente de performance para 3,2 também tiveram resultados negativos.

Após testados diversos casos e hipóteses que poderiam estar influenciando a simulação negativamente, podemos chegar a conclusão que a estratégia DOAS por si só não causa impactos significativos na redução energética, menores que 5% em todos os casos.

Portanto, ao separar o DOAS de sistemas de recuperação de calor conclui-se que não há redução de consumo energético apenas com o primeiro. Os artigos que propõem a utilização do DOAS tem reduções de consumo energético devido aos sistemas de recuperação de calor atrelados.

6. REFERÊNCIAS

ASHRAE.2001. Energy Standard for Buildings Except Low-Rise Residential Buildings. ASHRAE Standard 90.1; American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc.

ASHRAE TC 9.9. 2005 Datacom Equipment Power Trends and Cooling Applications, 2005.

ASHRAE TC 9.9. 2011 Thermal Guidelines for Data Processing Environments – Expanded Data Center. p. 1–45, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16401: Instalações de ar-condicionado – Sistemas centrais e unitários: ABNT, 2008.

Coad, W. 1999. “Conditioning Ventilation Air for Improved Performance and Air Quality.” HPAC Engineering: Setembro 1999.

De Lima D.X., 2013. Análise comparativa de ciclo economizadores em sistemas de climatização para data centers. Dissertação – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. 2013

Emmerich S.J., McDowell T.. 2005. Initial Evaluation of Displacement Ventilation and Dedicated Outdoor Air Systems for U.S. Commercial Buildings. NISTIR 7244; Julho 2005.

Koomey, J. G. Estimating Total Power Consumption by Servers in the U.S. and the World. Berkeley, Fevereiro 2007. Disponível em:

<<http://www-sop.inria.fr/mascotte/Contrats/DIMAGREEN/wiki/uploads/Main/svpwrusecompletefinal.pdf>>

Koomey, J. G. Growth in Data Center Electricity Use 2005 to 2010. Analytic Press, Agosto 2011. Disponível em:

<http://www.co.twosides.info/download/Koomey_Johnathon_G-Growth_In_Data_Center_Electricity_Use_2005_to_2010_2011.pdf>

Lintner, W.; Tschudi, B.; Vangeet, O.. Best Practices Guide for Energy-Efficient Data Center Design. Março 2011. Disponível em:

<<http://energy.gov/sites/prod/files/2013/10/f3/eedatacenterbestpractices.pdf>>

López, V.; Hamann, H. F. Heat transfer modeling in data centers. International Journal of Heat and Mass Transfer, v. 54, n. 25-26, p. 5306–5318, Dezembro 2011

Mumma, S.A. 2001. Designing Dedicated Outdoor Air Systems. ASHRAE Journal. p. 28-31, Maio 2001.

Parker, J.; Hugh, L.; Brown, B. Tackling Today's Data Center Energy Efficiency Challenges – A Software-Oriented Approach. Critical Power Now, p. 1–17, 2007.

Sun H. S., Lee S. E.. 2006. Case study of data centers energy performance. Energy and Buildings. Volume 38. p. 522-533. Maio 2006.