

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA - CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA  
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

AVALIAÇÃO DA ECONOMIA DE ENERGIA DE UM DATA CENTER COM *DIRECT  
AIR-SIDE FREE COOLING* ATRAVÉS DE SIMULAÇÃO TERMO ENERGÉTICA

por

Lucas de Borba

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Porto Alegre, novembro de 2020

## DADOS INTERNACIONAIS DE CATALOGAÇÃO

de Borba, Lucas  
AVALIAÇÃO DA ECONOMIA DE ENERGIA DE UM DATA CENTER  
COM DIRECT AIR-SIDE FREE COOLING ATRAVÉS DE SIMULAÇÃO  
TERMO ENERGÉTICA / Lucas de Borba. -- 2020.  
29 f.  
Orientador: Cirilo Seppi Bresolin.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) --  
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de  
Engenharia, Curso de Engenharia Mecânica, Porto  
Alegre, BR-RS, 2020.

1. Data center. 2. Resfriamento natural. 3.  
Economizador direto a ar. 4. Brasil. 5. EnergyPlus. I.  
Seppi Bresolin, Cirilo, orient. II. Título.

Lucas de Borba

AVALIAÇÃO DA ECONOMIA DE ENERGIA DE UM DATA CENTER COM *DIRECT AIR-SIDE FREE COOLING* ATRAVÉS DE SIMULAÇÃO TERMO ENERGÉTICA

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS  
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE  
**ENGENHEIRO MECÂNICO**  
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO  
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Mário Roland Sobczyk Sobrinho  
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Escolher uma das áreas de concentração: Energia e Fenômenos de Transporte

Orientador: Prof. Cirilo Seppi Bresolin

Comissão de Avaliação:

Prof<sup>a</sup>. Dra. Letícia Jenisch Rodrigues

Prof. Dr. Paulo Otto Beyer

Prof. Dr. Paulo Smith Schneider

Porto Alegre, novembro de 2020

## DEDICATÓRIA

Aos meus pais Nelson e Ivanir e ao meu irmão Vinicius, sem os quais o valor desta conquista não seria o mesmo.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço imensamente aos meus pais, cujo trabalho e suor diário me proporcionaram chegar a este momento.

À minha namorada Andrielle pelo apoio e paciência nas incontáveis horas de estudo e dissertação.

Aos aos colegas de trabalho da Petinelli por todo o aprendizado na minha formação profissional, aos Criativos que me mostram diariamente o significado de trabalho em equipe e especialmente a Gabi e Trinda, pelo apoio técnico na realização deste trabalho.

*Todos os modelos estão errados,  
mas alguns são úteis.*

*George E. P. Box*

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA - CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA  
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO – 2020

**AVALIAÇÃO DA ECONOMIA DE ENERGIA DE UM DATA CENTER  
COM AIR-SIDE FREE COOLING ATRAVÉS DE SIMULAÇÃO TERMO  
ENERGÉTICA**

**Lucas de Borba**

lborba.eng@gmail.com

**Resumo.** O objetivo deste estudo é avaliar o potencial da utilização de economizadores diretos a ar em data centers através da análise do seu consumo de energia. Para isso é especificado um data center padrão e sua operação avaliada com o uso do EnergyPlus em oito cidades brasileiras. As condições de operação são aquelas estabelecidas pelo ASHRAE Thermal Guidelines. Os resultados mostram que sob as condições mais restritivas de temperatura as cidades de Curitiba, Porto Alegre e São Paulo têm potencial para operar o ciclo economizador por mais de 50% do ano, atingindo uma economia de energia média de 8,67% sobre o caso base, enquanto as cidades localizadas em climas mais quentes como Fortaleza, Manaus e Rio de Janeiro têm pouca ou nenhuma economia. Sob condições de temperatura menos restritivas a maioria das cidades atingiu mais de 8700 horas por ano de operação. É observado que sob as condições da Classe Recomendada da ASHRAE a operação do ciclo economizador está fortemente relacionada com a temperatura de orvalho média anual, enquanto sob a Classe A4 o fator chave é a umidade relativa. É notado também que para os climas do Brasil não é necessário o uso de um sistema para controle da umidade interna.

**Palavras-chave:** data center, resfriamento natural, economizador direto a ar, Brasil, EnergyPlus.

**Energy consumption evaluation of a data center with air-side free cooling**

**Abstract.** The purpose of this study is to evaluate the use potential of direct air-side economizers in data centers through the analysis of its energy consumption. For this, a standard data center is specified and its operation is evaluated with the aid of EnergyPlus in eight Brazilian cities. The operating conditions are the envelopes established by ASHRAE Thermal Guidelines. The results show that under the strictest temperature conditions the cities of Curitiba, Porto Alegre and São Paulo all have potential to operate the economizer cycle over 50% of the year, achieving mean energy efficiency of 8.67% over the baseline case, while the cities located in warmer climates such as Fortaleza, Manaus and Rio de Janeiro have zero or no economy at all. Under more flexible temperature conditions, most cities achieved over 8700 hours a year of operation. It is observed that under ASHRAE's Recommended Range the cycle operation is strongly related to the mean dew point temperature throughout the year, whilst under the A4 Range the key factor is the relative humidity. It is also noted that in Brazilian climates it is not necessary to use system in order to control internal humidity.

**Keywords:** data center, free cooling, direct airside economizer, Brazil, EnergyPlus.

**LISTA DE FIGURAS**

Figura 1 - Classes de operação do <i>Thermal Guidelines</i> (2015).....	4
Figura 2 - Diagrama de um sistema típico de <i>direct airside free cooling</i> .....	5
Figura 3 - Modelo geométrico utilizado nas simulações .....	8
Figura 4 - Consumo anual sob a Classe Recomendada, sem aplicação de <i>free cooling</i> .....	11
Figura 5 - Consumo anual sob a Classe A4, sem utilização de <i>free cooling</i> .....	11
Figura 6 - Consumo anual sob a Classe Recomendada, com utilização de <i>free coolin.</i> .....	12
Figura 7 - Consumo anual sob a Classe A4, com utilização de <i>free cooling</i> .....	13



**LISTA DE TABELAS**

Tabela 1 - Distribuição dos data centers nas regiões do Brasil. ....	7
Tabela 2 - Requisitos mínimos de envoltória da ASHRAE 90.1-2016. ....	8
Tabela 3 - Parâmetros de dimensionamento e simulação de acordo com a ASHRAE 90.1-2016, Apêndice G. ....	9
Tabela 4 - Resultados das capitais analisadas. ....	13
Tabela A1 - Classificação da zona climática de acordo com a ASHRAE 90.1, Anexo 1-4. ...	18
Tabela B1 - Requisitos de temperatura e umidade para as classes de operação. ....	18
Tabela C1 - Características climáticas das cidades simuladas. ....	18

## NOMENCLATURA

### Símbolos

$\dot{q}_c$	Taxa de transferência de calor da serpentina de resfriamento	[W]
$\dot{q}_h$	Taxa de transferência de calor da serpentina de aquecimento	[W]
$\dot{q}_{vent}$	Dissipação de calor do ventilador	[W]
$\dot{m}$	Vazão mássica de ar	[kg/s]
$h$	Entalpia do ar	[kJ/kg]
$\dot{m}_f$	Vazão mássica de água de condensação	[kg/s]
$h_f$	Entalpia da água de condensação	[kJ/kg]
$\dot{m}_w$	Vazão mássica de vapor do umidificador	[kg/s]
$h_w$	Entalpia do vapor do umidificador	[kJ/kg]
$\dot{Q}$	Vazão volumétrica de ar	[m <sup>3</sup> /s]
$\dot{W}_{chiller}$	Energia consumida pelo <i>chiller</i>	[kWh]
$U$	Transmitância térmica	[W/m <sup>2</sup> ·K]
TBS	Temperatura de bulbo seco	[°C]
TBU	Temperatura de bulbo úmido	[°C]
$T_o$	Temperatura de orvalho	[°C]
UR	Umidade Relativa	[%]

### Símbolos gregos

$\sigma$	Densidade do ar	[kg/m <sup>3</sup> ]
----------	-----------------	----------------------

### Abreviaturas e acrônimos

TI	Teconologia da informação
ASHRAE	American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers
DOE	U.S. Department of Energy
TRY	Test Reference Year
SWERA	Solar and Wind Energy Resource Assessment
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
HDD	<i>Heating degree day</i>
CDD	<i>Cooling degree day</i>
COP	Coefficiente de performance
PSZ-HP	<i>Packaged single zone heat pump</i>
SZ-VAV	<i>Single zone variable air volume</i>
HVAC	<i>Heating, ventilation and air conditioning</i>

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
<b>2. FUNDAMENTAÇÃO.....</b>	<b>2</b>
2.1 Modelo e potência dos equipamentos.....	2
2.2 Arquivos climáticos e zonas climáticas .....	3
2.3 Condições internas de controle.....	3
2.4 Ciclo economizador .....	4
2.5 Controle do ciclo economizador .....	5
<b>3. METODOLOGIA.....</b>	<b>6</b>
3.1 Seleção de cidades.....	7
3.2 Geometria do modelo e potência dos equipamentos .....	7
3.3 Características construtivas.....	8
3.4 Sistema de HVAC e parâmetros de simulação.....	8
<b>4. RESULTADOS .....</b>	<b>10</b>
4.1 Consumo sem ciclo economizador.....	10
4.2 Consumo com ciclo economizador .....	12
<b>5. CONCLUSÃO.....</b>	<b>14</b>
5.1 Sugestões para trabalhos futuros .....	15
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>16</b>
<b>APÊNDICE A .....</b>	<b>18</b>
<b>APÊNDICE B .....</b>	<b>18</b>
<b>APÊNDICE C .....</b>	<b>18</b>

## 1. INTRODUÇÃO

A dependência dos diferentes setores da sociedade da tecnologia da informação tem causado uma crescente expansão no ramo de processamento, armazenamento e transferência de dados na última década (Shehabi et al., 2011), onde os Data Centers desempenham um papel central (Rong et al., 2016). Data Centers podem ser definidos como instalações que abrigam servidores de dados e sistemas de computadores que são aplicados a telecomunicações e outros propósitos (Phan e Lin, 2014).

Segundo Zhang et al. (2014), em 2010 a energia consumida por este tipo de instalação somava aproximadamente 1,3% de toda a energia consumida no mundo, e Shehabi et al. (2016) estimaram que este consumo poderia triplicar em uma década se a demanda continuasse crescendo neste ritmo e não houvessem avanços na eficiência no uso da energia. A intensidade da utilização de energia em data centers é cerca de 2,5 vezes maior do que a de lojas de departamentos, o segundo colocado entre os maiores consumidores, e cerca de 10 vezes maior do que a de edifícios comerciais padrão, sendo que o sistema de climatização é responsável por uma parcela de aproximadamente 40% deste montante (Lee e Chen, 2013), ficando atrás somente dos próprios equipamentos de TI.

Para mitigar o consumo de energia dos sistemas tradicionais por compressão de vapor é possível utilizar o *free cooling*. De acordo com Zhang et al. (2014), o *free cooling*, também conhecido como ciclo economizador, envolve o uso do clima natural para diminuir ou eliminar o uso da climatização mecanizada. Em outras palavras, quando o ar ou a água no ambiente externo estiverem a uma temperatura baixa o suficiente, o ciclo economizador pode ser utilizado como meio de resfriamento do data center e economizar energia.

Amado (2019) realizou um estudo acerca do potencial de aplicação de diferentes estratégias de *free cooling* em data centers utilizando dados climáticos de 14 diferentes cidades brasileiras. Os resultados mostraram que as cidades analisadas, em sua maioria, apresentaram condições favoráveis para a aplicação de ciclos economizadores, sobretudo os municípios localizados na região Sul do país, enquanto que as cidades da região Sul e Sudeste, com exceção da cidade de São Paulo apresentaram pouco ou nenhum potencial de utilização de *free cooling* devido às condições do clima. O critério elegibilidade utilizado foi uma comparação direta entre as condições do ar externo (temperatura de bulbo seco e temperatura de orvalho) e as condições de controle internas do ambiente.

De acordo com Pan al. (2008), modelos computacionais são utilizados para simular e prever o comportamento e o consumo de energia de edificações integrando informações como geometria, orientação solar, localização geográfica, características construtivas e tipos de sistemas, servindo como base para estimativas de custo e análises de ciclo de vida e como ferramenta de tomada de decisões em projetos. A utilização de *softwares* para simulação termo energética é apoiada por normas internacionais de padrão de eficiência energética, como ASHRAE 90.1, que contém uma série de pré-requisitos quanto às capacidades do programa utilizado, sendo o *EnergyPlus* um dos mais difundidos. O *EnergyPlus* é um *software* de simulação térmica e energética desenvolvido pelo DOE (*U.S. Department of Energy*) capaz de modelar o consumo de energia de sistemas de aquecimento, refrigeração, ventilação, iluminação e cargas de processo de forma integrada, resolvendo a simulação de forma simultânea e computando os resultados (*U.S. Department of Energy*, 2020).

Com isso pergunta-se, há potencial de aplicação de estratégias de *direct air-side free cooling* em data centers nos tipos de clima do Brasil?

Tendo em vista as capacidades da simulação termo energética e a sua relação com as variáveis climáticas, o presente estudo busca demonstrar através do *software EnergyPlus* o potencial da utilização de *free cooling* através da análise da economia de energia de um data centers em 8 cidades-chave brasileiras, levando em consideração estratégias de controle

críticas e a sua relação com as condições internas necessárias para sua operação contínua e confiável.

## 2. FUNDAMENTAÇÃO

### 2.1 Modelo e potência dos equipamentos

O estudo realizado por Lee e Chen (2013) sobre um modelo construído a partir de um projeto de um data center localizado em Taiwan concluiu que, de todos os fatores que compõem a carga térmica dos *chillers*, a parcela representada pelos equipamentos de TI (salas de servidores) excedia 90% da carga de pico. A parcela restante da carga térmica era composta de cargas internas (ocupantes e iluminação) e externas (infiltração e calor transmitido através do envoltório), chegando a representar menos de 4% em alguns dos casos analisados.

Na pesquisa de Cheung et al. (2018) são destacadas diferentes formas de se estimar o consumo de energia e a carga térmica de refrigeração dos equipamentos de TI em data centers. A modelagem mais detalhada envolve a utilização de parâmetros específicos como o número de servidores, potência de ventiladores, processadores, memória, e principalmente perfis de utilização (*status* ligado/desligado) de cada equipamento. Esta abordagem, embora mais precisa, envolve a colaboração entre engenheiros de diferentes áreas, como de sistemas de energia e de computação, e a compreensão de dados além dos que são geralmente encontrados nas especificações de *hardware* disponibilizadas pelos fabricantes. Outra abordagem também utilizada na estimativa da carga térmica é a adoção de uma densidade de potência de equipamentos constante, determinada conforme o tipo de equipamento e seu ano de fabricação.

O *U.S. Department of Energy* (DOE), como apoio ao aprimoramento contínuo das normas e códigos de eficiência energética propostos por organizações como a ASHRAE, desenvolveu modelos energéticos representativos de edifícios comerciais dos Estados Unidos, dentre os quais o modelo “*Large Office Building*”, possui um espaço específico denominado *computer room*. Segundo a norma ASHRAE 90.1 - *Energy Standard for Buildings Except Low-Rise Residential Buildings* (2016), a definição de *computer room* é de um espaço cuja função principal é abrigar equipamentos de processamento e armazenamento de dados, podendo conter mesas de escritório, onde a potência projetada para os equipamentos de TI é superior a 215 W/m<sup>2</sup>. Já em *core data centers* (salas dedicadas a abrigar somente fileiras de servidores) a potência típica dos equipamentos de TI fica entre 484 W/m<sup>2</sup> e 646 W/m<sup>2</sup>, dependendo do ano de sua fabricação, como apontado por Goel et al. (2014) e Cheung et al. (2018).

Na revisão de literatura foram encontradas diferentes referências de modelagem utilizadas em estudos passados sobre data centers. Phan e Lin (2014) propuseram um modelo de data center padrão com aproximadamente 111,5 m<sup>2</sup> de área condicionada e densidade de potência de equipamentos de 1076,4 W/m<sup>2</sup>. Hong et al. (2008) utilizaram um modelo de aproximadamente 92,9 m<sup>2</sup> para avaliar as diferenças entre resultados de dois motores de simulação, também utilizando densidade de potência dos equipamentos de TI com 1076,4 W/m<sup>2</sup>. Cheung, H. et al. (2018) desenvolveram um modelo dinâmico para estimar o consumo de energia de equipamentos de TI utilizando o modelo *Large Office* do DOE, onde a área relativa ao data center era de 780 m<sup>2</sup> e a densidade de potência de 484 W/m<sup>2</sup>. Já Lee e Chen (2013) utilizaram um modelo baseado em um data center existente cuja área condicionada total ocupada pelos equipamentos de TI era de aproximadamente 4480 m<sup>2</sup>, e a densidade de potência utilizada foi de 1587,8 W/m<sup>2</sup>.

## 2.2 Arquivos climáticos e zonas climáticas

Estando os resultados das simulações termo energéticas de edificações relacionados diretamente com a qualidade dos dados climáticos empregados, a seleção do arquivo climático utilizado pelo programa de simulação deve ser feita com devida diligência.

Um estudo conduzido por Scheller et al. (2015) ressalta que fatores como a localização das estações climáticas ou mal funcionamento dos equipamentos influenciam na qualidade dos dados registrados. A escassez de estações que geram dados de radiação solar também prejudica o alcance de dados de qualidade.

Atualmente existem diferentes tipos de arquivos climáticos disponíveis para o Brasil, que são classificados de acordo com suas variáveis e fonte de dados. Os principais são TRY (*Test Reference Year*), SWERA (*Solar and Wind Energy Resource Assessment*) e INMET sendo este último composto de dados medidos nas estações automáticas do Instituto Nacional de Meteorologia.

No estudo de Scheller et al. (2015) foi feita a comparação entre os dados dos três tipos de arquivo climático utilizando as variáveis de temperatura de bulbo seco, temperatura de orvalho e irradiância solar. Foram constatadas diferenças de até 3 °C com relação às temperaturas de bulbo seco e úmido registradas para o mesmo período de medição entre as fontes de dados climáticos. Entretanto, pôde-se notar através dos resultados que todas apresentavam o mesmo comportamento. As diferenças de temperaturas que afetam a qualidade dos dados se devem principalmente ao fato de que as estações de medição geralmente estão localizadas em aeroportos, não registrando assim os efeitos do terreno típico de centros urbanos no microclima. Foi constatado ainda que os arquivos das estações automáticas do INMET apresentavam falhas na coleta de dados em alguns períodos de tempo.

Atualmente estão disponíveis arquivos climáticos do projeto SWERA para vinte cidades brasileiras, conjunto que compreende apenas sete das oito cidades que são objetos deste estudo, faltando apenas a cidade de Porto Alegre.

Tendo isto em vista, a fim de manter a coerência quanto ao tipo de arquivo climático empregado, optou-se por utilizar os arquivos TRY disponibilizados no site [Climate.OneBuilding.Org](http://Climate.OneBuilding.Org), que representam um ano de dados médios para cada local específico, determinados sobre um período de dez anos de medição, sem os extremos de temperatura.

A classificação das zonas climáticas da norma ASHRAE 169 - *Climatic Data for Building Design Standards* (2013), referenciada na norma ASHRAE 90.1-2016, baseia-se em percentuais de ocorrência anual e mensal de temperaturas, medições de umidade e velocidade do vento. A classificação leva em conta os valores médios anuais de HDD (aquecimento) e CDD (resfriamento), sendo estes a diferença entre a temperatura externa média em um período de 24h e a temperatura de referência para o local ou país específico, como exemplificado na Tabela A1 do Apêndice A.

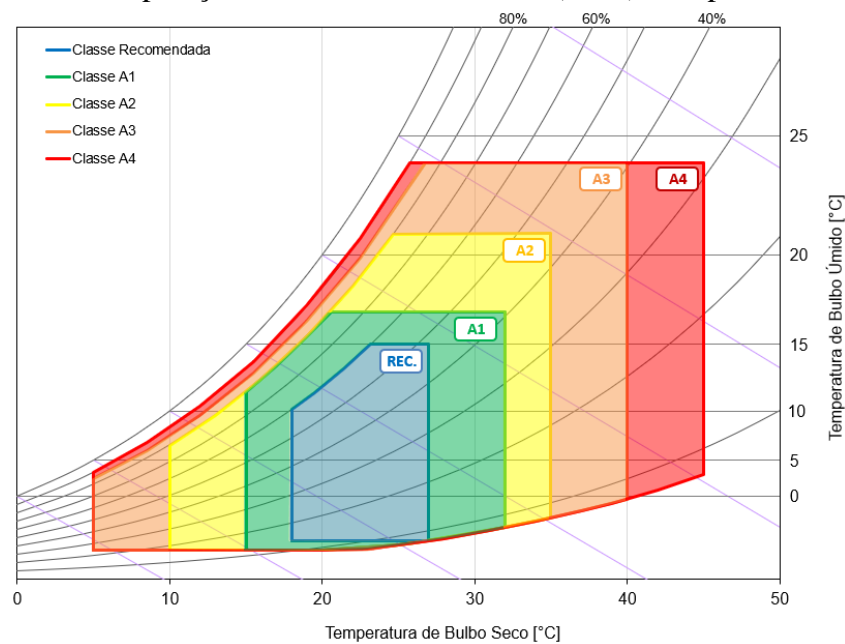
## 2.3 Condições internas de controle

Com a tendência no aumento das densidades de potência dos equipamentos de TI surgiu em 2003 o ASHRAE *Technical Committee 9.9*, com a função de consolidar o alinhamento entre os fabricantes de equipamentos e as equipes de operação através da padronização das condições ambientais de operação de data centers (ASHRAE TC 9.9, 2011). Desde 2004 o ASHRAE TC 9.9 publicou quatro edições do “*Thermal Guidelines for Data Processing Environments*”, documento contendo diretrizes e recomendações de operação tomadas como parâmetros de projeto pelos fabricantes. Em sua primeira edição o intervalo de operação foi planejado para ser a condição de maior confiabilidade enquanto ainda atingia uma economia de energia razoável. Com a necessidade de se atingir maior eficiência na operação, as edições seguintes propuseram novas Classes de operação com maiores limites de temperatura e umidade,

ampliando as oportunidades de se utilizar de estratégias de *free cooling* por mais horas no ano. O documento *Thermal Guidelines* afirma também que é aceitável que o data center opere fora das condições recomendadas por curtos períodos de tempo sem que haja perda na confiabilidade dos equipamentos, já que elas foram desenvolvidas com base em dados disponibilizados pelos fabricantes (ASHRAE TC 9.9, 2011).

Na edição mais atual do *Thermal Guidelines* (2015) as condições de operação estão divididas em cinco classes (Recomendada, A1, A2, A3 e A4) com limites superiores e inferiores de temperatura de bulbo seco, temperatura de orvalho e umidade relativa distintos, mostrados na Tabela B1 do Apêndice B e representados graficamente na Figura 1. Cada classe representa tipos distintos de data centers conforme o tipo de equipamentos aos quais são adequados (ASHRAE TC 9.9, 2011).

Figura 1 - Classes de operação do *Thermal Guidelines* (2015). Adaptado de Amado, 2019.



A Classe Recomendada abriga tipicamente servidores empresariais e servidores de armazenamento de dados, sendo adequado para operações de missão crítica. As classes A1, A2, A3 e A4 possuem limites menos restritivos e abrigam tipicamente servidores para aplicações em escritórios e laboratórios ou servidores individuais.

## 2.4 Ciclo economizador

As duas categorias de *free cooling* mais difundidas são *airside* e *waterside economizers*, que podem ainda ser divididas entre ciclos diretos ou indiretos. Na estratégia de *waterside* o meio de resfriamento utilizado é a água. No caso do *indirect waterside economizer* o sistema opera com um circuito secundário de água resfriada através de um *dry cooler* ou torre de resfriamento, evitando o uso do compressor quando as condições do ar externo forem favoráveis para este tipo de operação. Já no caso do *direct waterside economizer* a água é captada de uma fonte natural próxima da edificação e circulada diretamente por serpentinas de resfriamento no interior do data center.

O *airside free cooling*, por outro lado, utiliza o ar externo como meio de remoção de calor do ambiente. No *indirect airside economizer* o resfriamento é feito por meio de ventiladores em conjunto com trocadores de calor intermediários ar/ar, com rodas entálpicas e trocadores de placas ou tubos (Niemann et al., 2014). Segundo Zhang et al. (2014) a estratégia de *direct*

*airside free cooling* consiste em um sistema composto por controles, dutos e ventiladores que insufla o ar externo diretamente para o ambiente onde estão localizados os equipamentos de TI, sem intermédio de trocadores de calor, permitindo redução parcial ou total do uso do compressor durante horas de operação em que o clima for ameno ou frio.

Ainda, segundo Niemann et al. (2014), a estratégia pela introdução direta de ar externo é a mais simples de ser implementada por possuir o menor *footprint* (área ocupada por capacidade de refrigeração), além de dispensar o consumo de água inerente aos sistemas do tipo *waterside*. Após estas considerações o sistema escolhido como parâmetro deste estudo foi o *direct airside economizer*.

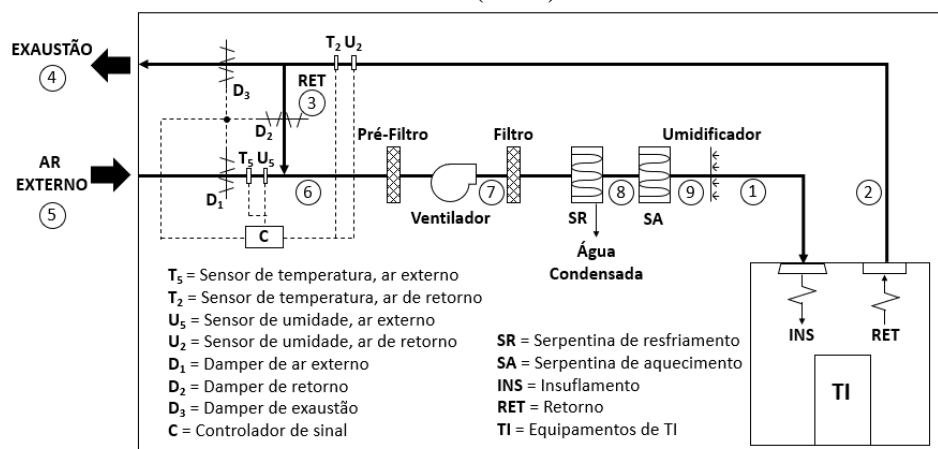
## 2.5 Controle do ciclo economizador

Son e Lee (2016) utilizaram o *EnergyPlus* para avaliar o consumo de um edifício comercial em diferentes cidades (Incheon, Madison, Miami e San Francisco), utilizando ciclo economizador com tipos diferentes de controles, nomeadamente “por diferença de temperatura” e “por diferença de entalpia”. O estudo mostrou que nos climas mais úmidos (Incheon, Madison e Miami) o controle por diferencial de entalpia foi capaz de reduzir mais o consumo do que o controle por diferença de temperatura, principalmente nos climas onde a temperatura típica era superior a 23 °C.

Aktacir (2011) realizou um estudo acerca da influência do tipo de controle de um ciclo economizador sobre o consumo de energia de um edifício comercial em Antalya (Turquia), uma cidade localizada na zona climática 3A de acordo com a classificação da ASHRAE, e concluiu que o controle por diferença de entalpia é o que resulta em maior economia.

O *EnergyPlus* possui a opção de simular um ciclo economizador combinado a uma gama de diferentes lógicas de controle. O controle utilizado neste estudo foi o por diferença de entalpia (*Differential Enthalpy*), que compara as entalpias do ar de retorno e do ar externo. Se a entalpia do ar externo for maior do que a entalpia do ar de retorno, a simulação configura a vazão de ar externo para a vazão mínima escolhida, caso contrário, o a simulação ativa o economizador e os *dampers* então modulam a razão entre a vazão de ar externo e a vazão do ar de retorno de forma a atingir o *setpoint* (U.S. Department of Energy, 2019). O esquema típico de um economizador direto a ar está representado no diagrama da Figura 2.

Figura 2 - Diagrama de um sistema típico de *direct airside free cooling*. Adaptado de Lee e Chen (2013).



Este sistema utiliza registros ( $D_{1,2,3}$ ) para ajustar a proporção de ar externo (5) e de ar de retorno (2) de acordo com os valores de temperatura e umidade medidos pelos sensores ( $T_{2,5}$   $U_{2,5}$ ). Baseado nestes valores o sistema executa um cálculo para determinar a diferença de



entalpia entre o ar de retorno e o ar externo que serve como critério para a ativação do ciclo economizador. Se a entalpia do ar externo for menor do que a entalpia do ar de retorno, o ar externo tem efeito de resfriamento sobre o ambiente interno.

De acordo com as leis de conservação da energia de um escoamento em regime estacionário, a energia de resfriamento e desumidificação e de aquecimento e umidificação pode ser expressada, respectivamente, por:

$$\dot{q}_c = (\dot{m}_3 h_3 + \dot{m}_5 h_5) + \dot{q}_{\text{vent}} - \dot{m}_8 h_8 + \dot{m}_f h_{f,8} \quad (1)$$

$$\dot{q}_h + \dot{m}_w h_w = \dot{m}_1 h_1 - \dot{m}_8 h_8 \quad (2)$$

na qual  $\dot{m}$  e  $h$  representam respectivamente a vazão mássica (kg/s) e a entalpia (kJ/kg) em cada estado,  $\dot{m}_f$  e  $h_{f,8}$  a vazão mássica e entalpia da água condensada no estado 8 (desumidificação),  $\dot{q}_c$  a taxa de transferência de calor (W) da serpentina de resfriamento,  $\dot{q}_{\text{vent}}$  a dissipação de calor do ventilador (W),  $\dot{q}_h$  a taxa de transferência de calor da serpentina de aquecimento (W),  $\dot{m}_w$  e  $h_w$  a vazão mássica (kg/s) e entalpia da umidificação (kJ/kg).

A equação (1) pode ser expressada em termos da vazão volumétrica  $\dot{Q}$  (m<sup>3</sup>/s) e densidade  $\sigma$  (kg/m<sup>3</sup>):

$$\dot{q}_c = (\dot{Q}_3 \sigma_3 h_3 + \dot{Q}_5 \sigma_5 h_5) + \dot{q}_{\text{vent}} - \dot{Q}_8 \sigma_8 h_8 + \dot{m}_f \dot{q}_{f,8} \quad (3)$$

A taxa de variação da energia consumida pelo *chiller*  $\dot{W}_{\text{chiller}}$  (W) pode ser expressa em termos da razão entre a taxa de transferência de calor da serpentina de resfriamento e o seu coeficiente de performance (COP), de forma que:

$$\dot{W}_{\text{chiller}} = \frac{\dot{q}_c}{\text{COP}} \quad (4)$$

De acordo com a Equação (3),  $\dot{Q}_5$  será maior e  $\dot{Q}_3$  será menor quando a vazão de ar externo for superior a do ar de retorno e  $\dot{q}_c$  reduzirá gradualmente quanto menor for  $h_5$  em relação a  $h_3$ , que de acordo com a Equação (4) reduz a energia consumida pelo *chiller*. Quando a vazão insuflada for 100% de ar externo ( $\dot{Q}_5 = \dot{Q}_8 = \dot{Q}_4$ ), e  $\dot{Q}_3$  for igual a 0,  $\dot{q}_c$  se torna proporcional a  $h_5$ . Quando  $h_5$  baixa até um determinado valor,  $\dot{q}_c$  se iguala a 0 e ativação do *chiller* pode ser dispensada.

Entretanto, se a umidade relativa do ar externo for muito alta ou muito baixa, aumenta a demanda de umidificação ( $\dot{m}_w h_w$ ) ou desumidificação ( $\dot{m}_f h_{f,8}$ ) para satisfazer os limites de operação sugeridos pelo *Thermal Guidelines*, o que pode prejudicar a economia de energia alcançada com o ciclo economizador. Por conta disto fez-se necessário incluir no escopo do estudo um umidificador por vaporização para verificar sua influência nos resultados dos climas estudados.

### 3. METODOLOGIA

Para realização da análise será proposto um modelo energético de data center padrão com o mesmo envoltório, densidade de potência de equipamentos e tipo de sistema de climatização. O data center foi elaborado no *EnergyPlus* em conjunto com o *SketchUp* e o *plug-in OpenStudio*, no qual foi implementado um ciclo economizador com controle por diferença de entalpia. O modelo será simulado nas cidades brasileiras selecionadas com e sem o uso do economizador sob as Classes Recomendada e A4 sugeridas pelo ASHRAE TC 9.9 (casos

extremos), e seu consumo anual de energia será comparado. Foi incluído na simulação também um sistema de umidificação por vaporizador elétrico com acionamento pelo *setpoint* de umidade relativa do ambiente interno.

Os resultados foram avaliados em termos de horas/ano em que o economizador permanece ativo, e de consumo absoluto de energia nos casos com e sem o economizador, que serão posteriormente relacionados com as variáveis climáticas de cada local.

### 3.1 Seleção de cidades

A fim de analisar o comportamento do ciclo economizador nos diferentes climas do Brasil foram escolhidas cidades com localizações geográficas distintas. Segundo a classificação da norma ASHRAE 169, o Brasil compreende as zonas climáticas 0A, 1A, 2A e 3A, respectivamente classificadas como *extremely hot humid*, *very hot humid*, *hot humid* e *warm humid*. Para garantir a representatividade de todas as zonas climáticas foram escolhidas as cidades de Fortaleza – CE (0A), Rio de Janeiro – RJ (1A), São Paulo – SP (2A) e Curitiba – PR (3A). Ainda, devido a sua relevância econômica para o país, foram escolhidas também as cidades de Manaus – AM (0A), Belo Horizonte – MG (2A), Brasília – DF (2A) e Porto Alegre - RS (2A). As cidades escolhidas representam todas as regiões do Brasil onde, segundo o site *Data Centers World Map*, os data centers estão distribuídos conforme a Tabela 1.

Tabela 1 - Distribuição dos data centers nas regiões do Brasil.

Região	Data Centers	Representatividade	Cidades Escolhidas
Sudeste	89	63.1%	3
Sul	23	16.3%	2
Centro-Oeste <sup>1</sup>	9	6.4%	1
Nordeste	14	9.9%	1
Norte	6	4.3%	1
<b>Total</b>	<b>141</b>	<b>100%</b>	<b>8</b>

<sup>1</sup>Sendo 4 só no DF.

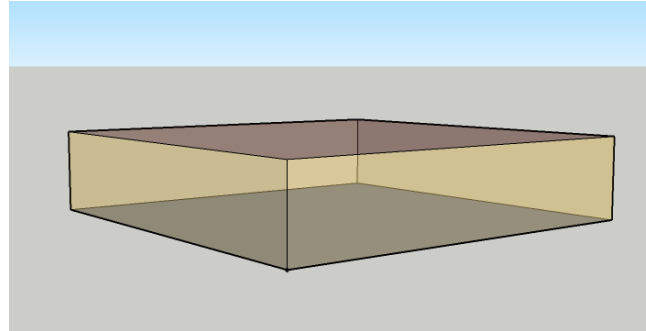
Em paralelo à classificação adotada pela ASHRAE 169-2013, a NBR 15220-3 também classifica as cidades Brasileiras em zonas de acordo com suas características bioclimáticas. Conforme a classificação da NBR 15220-3, as cidades escolhidas localizam-se nas zonas 1 (Curitiba), 3 (Belo Horizonte, Porto Alegre e São Paulo), 4 (Brasília) e 8 (Fortaleza, Manaus e Rio de Janeiro). Ainda que as zonas 2, 5, 6 e 7 da norma brasileira não tenham sido contempladas neste estudo, espera-se obter resultados que sirvam de referência para as principais cidades e regiões onde atualmente estão localizados os data centers do país, analisando ao menos um local de acordo com a classificação adotada pela ASHRAE.

### 3.2 Geometria do modelo e potência dos equipamentos

Levando em consideração o fato de o estudo não se basear em uma edificação real, optou-se por desenvolver um modelo baseado nas pesquisas que envolveram modelos padronizados de zona única, de dimensões 15 m x 15 m x 3,15 m, e adotar a abordagem simplificada na representação dos equipamentos, utilizando uma densidade de potência de 565 W/m<sup>2</sup>, sendo este valor uma média das densidades típicas segundo Cheung, H. et al. (2018). O regime de operação considerado para o data center foi contínuo com 100% da carga dos equipamentos presente no decorrer do ano. Foi escolhido utilizar um modelo de zona única, onde segundo Phan e Lin (2014) é assumido que o ar interno é bem misturado e a temperatura é uniforme em

toda a zona térmica. Foi adotada uma geometria quadrada (simétrica) no modelo para eliminar o efeito que uma possível variação na orientação solar surtiria na carga térmica externa da edificação. Além disso, as condições de contorno adotadas foram *ground* para a superfície do chão e *outdoors* para as demais superfícies. O modelo utilizado nas simulações está mostrado na Figura 3.

Figura 3 - Modelo geométrico utilizado nas simulações.



Para fins de padronização, os parâmetros do envoltório, o sistema de ar condicionado e a densidade de potência de iluminação utilizados no modelo foram baseados nos requisitos mínimos de eficiência exigidos pelo Apêndice G – *Performance Rating Method* da norma ASHRAE 90.1-2016, que apresenta parâmetros para a construção e simulação de modelos térmicos e energéticos de referência (*baseline buildings*).

### 3.3 Características construtivas

Os valores de máxima transmitância térmica (Fator U) para superfícies opacas exigidos pela ASHRAE 90.1-2016 estão descritos na Tabela 2.

Tabela 2 - Requisitos mínimos de envoltória da ASHRAE 90.1-2016.

Superfície	Construção <sup>1</sup>	Máximo Fator U [W/m <sup>2</sup> K]
Coberturas	<i>Insulation entirely above deck</i>	0,360
Paredes	<i>Steel-frame</i>	0,705
Piso	<i>Steel-joist</i>	0,296 <sup>2</sup>

<sup>1</sup>Construções padrão referentes aos valores normativos.

<sup>2</sup>Valor normativo mais restritivo, as zonas 0A e 1A permitem máximo fator U de até 1,986 W/m<sup>2</sup>·K.

A utilização de materiais mais adequados na construção de data centers é uma medida de eficiência energética e pode trazer melhores resultados, porém não é o objeto de estudo do presente trabalho. Optou-se por utilizar os valores de transmitância térmica determinados pela ASHRAE em detrimento das diretrizes construtivas da NBR 15220-3 por serem mais restritivos, e também a fim de manter a coerência com as demais referências normativas adotadas em outros aspectos do modelo desenvolvido.

### 3.4 Sistema de HVAC e parâmetros de simulação

Nos estudos sobre simulação de data centers revisados foram utilizados tipos diferentes de sistemas de ar condicionado que atendiam a carga térmica dos modelos, sendo eles o *packaged*

*rooftop heat pump* e *single zone VAV* (volume de ar variável) com água gelada, respectivamente “Sistema 4 - PSZ-HP” e “Sistema 11 – SZ-VAV”, de acordo com a classificação da ASHRAE 90.1-2016. O primeiro tipo de sistema consiste em uma unidade completa contendo filtros, *dampers*, serpentinas de resfriamento e aquecimento e unidade condensadora agrupados em um único invólucro, comumente posicionada na cobertura das edificações, que distribui o ar para as zonas térmicas as quais serve através de um sistema de dutos. O ventilador das unidades PSZ-HP é de volume constante, e o condicionamento do ar é feito através de expansão direta (ciclo de resfriamento) e bomba de calor (ciclo de aquecimento). Já o segundo sistema consiste no uso de uma unidade de tratamento análoga, porém com resfriamento por serpentina de água gelada suprida por um *chiller* e o aquecimento, quando necessário, feito através de resistência elétrica.

O Apêndice G da ASHRAE 90.1-2016 prescreve que *computer rooms*, quando possuem um sistema de HVAC do tipo “Sistema 4”, não devem possuir ciclos economizadores, imposição que não é aplicada caso o data center seja servido por um “Sistema 11”.

A determinação do tipo de sistema de climatização para os edifícios de referência modelados utilizando o Apêndice G toma como referência a tipologia da edificação e sua área total condicionada. Por se tratar de um modelo padrão, e não refletir a geometria real de uma edificação, optou-se então por desconsiderar este critério de seleção e utilizar o Sistema 11, a fim de observar os efeitos do economizador sobre o consumo anual de energia. O apêndice normativo especifica ainda parâmetros de eficiência mínima que devem ser seguidos na modelagem do Sistema 11.

Como parâmetro de taxa mínima de renovação de ar foram adotados os requisitos da norma ASHRAE 62.1 – *Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality* (2016), considerando um ocupante, totalizando uma vazão de 252 m<sup>3</sup>/h. Os parâmetros utilizados na modelagem estão descritos na Tabela 3.

Tabela 3 - Parâmetros de dimensionamento e simulação de acordo com a ASHRAE 90.1-2016, Apêndice G.

Parâmetro	Descrição
Características gerais	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Ventilador com controle variável;</li> <li>2. Resfriamento com água gelada;</li> <li>3. Aquecimento por resistência elétrica;</li> <li>4. Umidificação por vaporizador elétrico;</li> <li>5. Densidade de potência de iluminação: 14,3 W/m<sup>2</sup>;</li> <li>6. Densidade de potência dos equipamentos de TI: 565 W/m<sup>2</sup>;</li> </ol>
Chiller	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Um <i>chiller</i> elétrico do tipo parafuso com condensação a água;</li> <li>2. Coeficiente de performance: 4,45;</li> <li>3. Capacidade: <i>autosize</i>, com fator de dimensionamento de 1,15 para resfriamento e 1,25 para aquecimento;</li> <li>4. Água gelada: suprida a 6,7 °C e retorno a 13°C;</li> <li>5. <i>Reset</i> de temperatura: 7 °C a 27 °C e acima, 12°C a 16°C e abaixo;</li> <li>6. Carga parcial mínima: 25%;</li> <li>7. Bomba primária constate, de potência: 140 Ws/L</li> <li>8. Bomba secundária variável, de potência: 210 Ws/L</li> </ol>
Rejeição de calor	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Torre de resfriamento de circuito aberto;</li> <li>2. Potência da bomba de condensação: 300 Ws/L</li> <li>3. Ventilador axial com controle de velocidade variável;</li> </ol>

Ventiladores	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Ventilador de volume variável;</li> <li>2. Vazão mínima (renovação de ar): 252 m<sup>3</sup>/h (0,3 Lm<sup>2</sup>/s e 2,5 L/s por ocupante, 1 ocupante);</li> <li>3. Vazão máxima: <i>autosize</i>, baseado em temperatura de insuflamento com diferença de 11 °C em relação ao <i>setpoint</i> de temperatura (por Classe);</li> <li>4. Potência: 1077 Ws/m<sup>3</sup>, com potência ajustada com baseado na seção G3.1.2.9 da ASHRAE 90.1-2016, Apêndice G;</li> </ol>
Dia de projeto	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Aquecimento: frequência 99,6% TBS;</li> <li>2. Resfriamento: frequência 1% TBS-TBU;</li> </ol>
Condições de controle	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Classe Recomendada: Aquecimento/Resfriamento: 18/24 °C; Umidade: UR 8%<sup>1</sup>; Desumidificação: UR 48,7%<sup>2</sup>;</li> <li>2. Classe A4: Aquecimento/Resfriamento: 5/45 °C; Umidade: UR 8%<sup>1</sup>; Desumidificação: UR 31,1%<sup>3</sup>;</li> </ol>

<sup>1</sup>Por conta de limitações no controle da simulação e sendo a menor ocorrência anual de To de 0 °C (Belo Horizonte), optou-se por desconsiderar o limite inferior de To de -12 °C.

<sup>2</sup>UR máxima baseada no limite superior de TBS da Classe Recomendada.

<sup>3</sup>UR máxima baseada no limite superior de TBS da Classe A4.

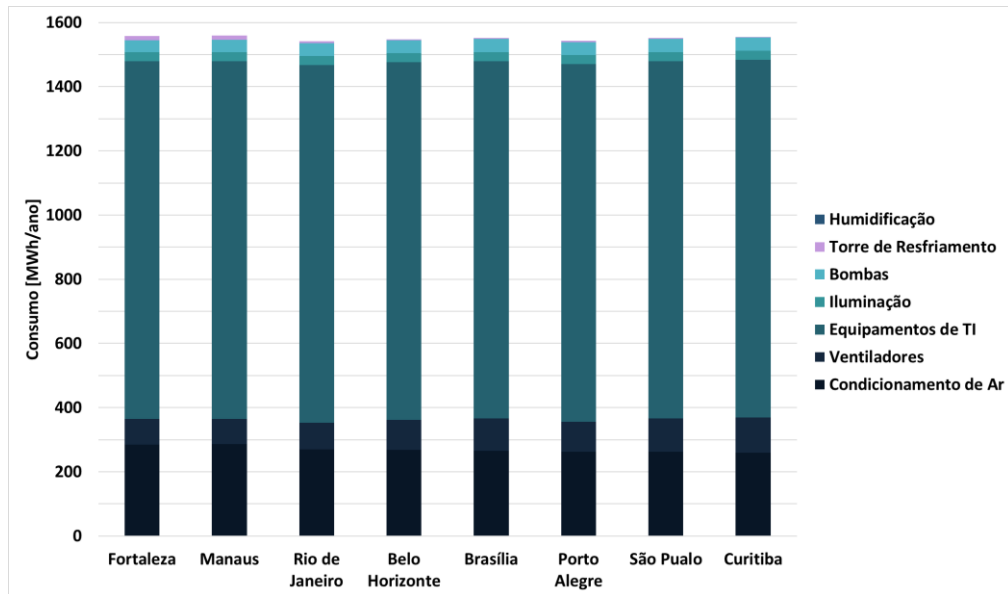
## 4. RESULTADOS

Foram realizadas simulações utilizando arquivos climáticos de oito capitais brasileiras para avaliar o potencial de uso da estratégia de *direct airside free cooling* através da análise da economia de energia de um data center. Para tanto, foi utilizado um modelo padronizado servido por um sistema de climatização composto por ventilador de volume variável, *chiller* com condensação à água e um umidificador elétrico, todos ajustados conforme os parâmetros mínimos de eficiência da norma ASHRAE 90.1. Foram avaliados os consumos dos modelos com ciclo economizador em relação aos modelos sem o ciclo economizador, sob as condições de controle das classes Recomendada e A4 propostas pelo ASHRAE TC 9.9. Foram feitas observações também quanto ao número total de horas por ano de ativação do ciclo e a sua relação com as variáveis climáticas e a economia de energia.

### 4.1 Consumo sem ciclo economizador

Nas simulações onde as condições de controle interno atendiam à classe Recomendada, o consumo anual de energia sem a presença do ciclo economizador foi semelhante para todas as cidades, ficando em média 1550,96 MWh. A cidade que apresentou o maior consumo de energia foi Manaus, com um consumo de 1559,84 MWh, dos quais 26,7% foram referentes ao sistema de climatização e sistemas auxiliares (ventiladores, bombas de água gelada, bomba de condensação e torre de resfriamento). A cidade com o melhor desempenho foi Rio de Janeiro, cujo consumo foi de 1541,79 MWh, dos quais 25,9% foram referentes ao sistema de climatização e sistemas auxiliares. De acordo com as características do data center simulado, quanto menor a representatividade dos sistemas de climatização, mais eficiente será o data center. O consumo total do data center e de cada sistema sob as condições da Classe Recomendada são mostrados na Figura 4.

Figura 4 - Consumo anual sob a Classe Recomendada, sem aplicação de *free cooling*.

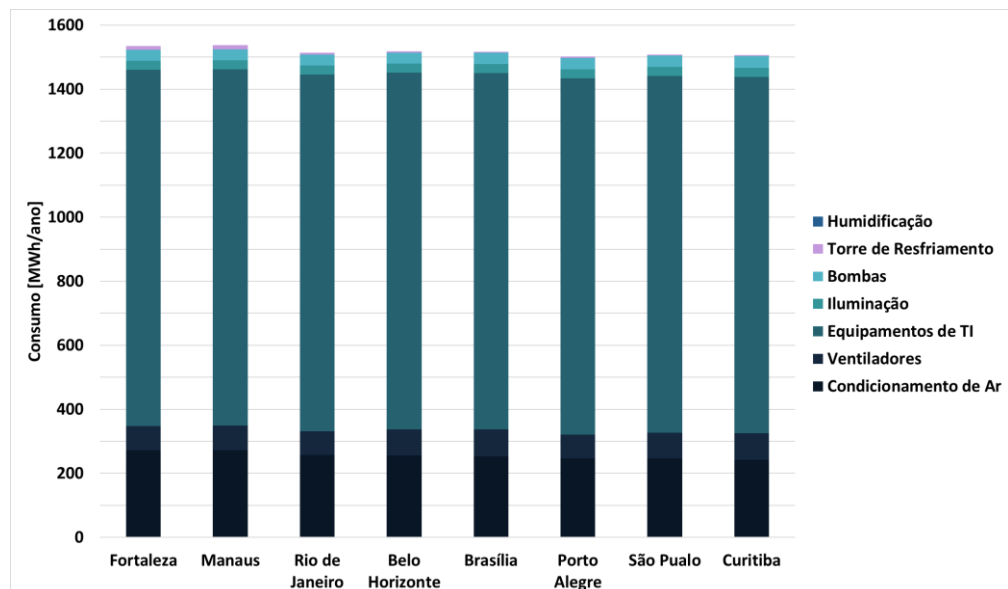


De forma análoga, considerando as condições de controle interna atendendo aos requisitos da Classe A4, a cidade que apresentou maior consumo anual foi Manaus, com 1537,8 MWh dos quais 25,8% correspondem ao sistema de condicionamento de ar e sistemas auxiliares. A cidade com menor consumo foi Porto Alegre, com 1501,69 MWh, dos quais 24% correspondem ao sistema de climatização e sistemas auxiliares. O consumo total e a representatividade de cada sistema sob as condições de controle da Classe A4 são mostrados na Figura 5.

Em todos os casos o consumo com aquecimento foi nulo devido à grande carga interna proveniente dos equipamentos de TI.

A diferença entre os consumos anuais dos casos com condições de controle internas distintas se deve à diferença entre os *setpoints* de temperatura constante da Classe Recomendada (27 °C) e da Classe A4 (45 °C).

Figura 5 - Consumo anual sob a Classe A4, sem utilização de *free cooling*.



#### 4.2 Consumo com ciclo economizador

Nas simulações que incluíram o uso do ciclo economizador nas horas do ano em que a entalpia externa era inferior à entalpia do ar de retorno, 6 das 8 cidades simuladas conseguiram atingir alguma economia de energia. Levando em consideração as condições de controle da Classe Recomendada, a cidade que teve melhor desempenho foi Curitiba, com um consumo de 1386,6 MWh, representando uma economia de 10,84% em relação ao caso sem o uso de estratégia de *free cooling*. O ciclo economizador não entrou em operação durante nenhuma hora do ano nos casos de Fortaleza e Manaus pois até a menor entalpia externa foi superior à entalpia do ar interno no decorrer do ano nestas cidades. Excluindo-se estes dois casos, o caso que apresentou o maior consumo foi o da cidade do Rio de Janeiro, com 1525,63 MWh, representando uma economia de apenas 1,05% em relação ao caso sem o ciclo economizador. Os consumos e a representatividade de cada sistema sob as condições da Classe Recomendada são mostrados na Figura 6.

Nos casos de simulação onde o *setpoint* de controle interno foi de 45°C (Classe A4) todas as cidades alcançaram alguma economia de energia. O melhor desempenho energético foi na cidade de Belo Horizonte, com um consumo anual de 1271,28 MWh, representando uma economia de 16,25% em relação ao caso sem a utilização do ciclo economizador. Já a cidade com o pior desempenho foi a cidade de Manaus, onde o consumo anual foi de 1356,35 MWh, refletindo uma melhora de desempenho de apenas 11,8% em relação ao caso sem a utilização de estratégias de *free cooling*. Os consumos e a representatividade de cada sistema sob as condições da Classe A4 são mostrados na Figura 7.

O caso com o maior consumo do sistema de umidificação foi o de Curitiba sob as condições de controle interna da Classe A4, onde o ciclo entrou em operação na totalidade das horas do ano. Entretanto seu consumo foi de apenas 270 kWh, representando 0,02% do consumo total, o que indica que, mesmo nos climas mais secos do país, a utilização de tal sistema por ser negligenciável. Os resultados da economia absoluta e relativa de energia para cada cidade, e o número de horas em que o ciclo economizador esteve em operação podem ser conferidos na Tabela 4.

Figura 6 - Consumo anual sob a Classe Recomendada, com utilização de *free cooling*.

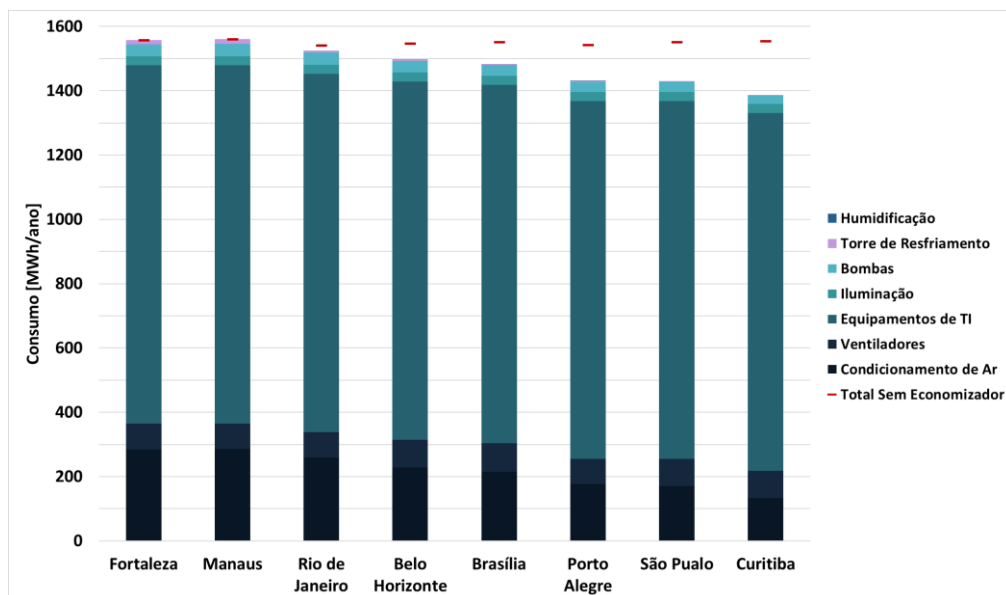


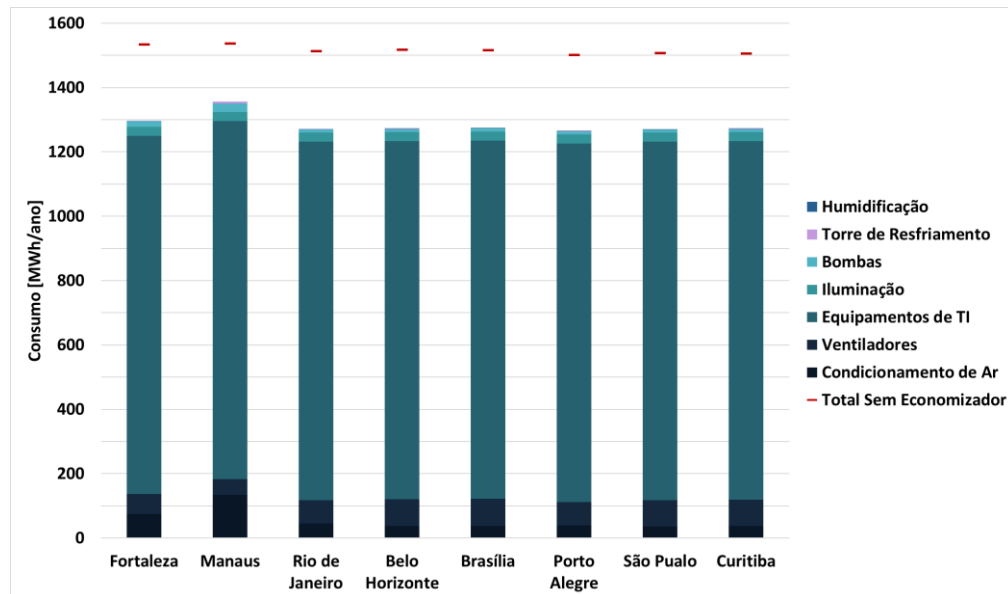
Figura 7 - Consumo anual sob a Classe A4, com utilização de *free cooling*.

Tabela 4 - Resultados das capitais analisadas.

Cidade	Classe Recomendada			Classe A4		
	Economia de Energia [MWh/ano]	Uso do Ciclo [h]	Uso do Ciclo [h]	Economia de Energia [MWh/ano]	Uso do Ciclo [h]	Uso do Ciclo [h]
Fortaleza	0,00	0,00%	0	237,94	15,50%	8754
Manaus	0,00	0,00%	0	181,46	11,80%	8601
Rio de Janeiro	16,16	1,05%	1109	243,05	16,05%	8723
Belo Horizonte	51,52	3,33%	3303	246,64	16,25%	8760
Brasília	67,70	4,36%	3677	243,33	16,04%	8760
Porto Alegre	112,84	7,31%	4996	237,85	15,84%	8760
São Paulo	121,99	7,86%	5789	238,79	15,83%	8760
Curitiba	168,58	10,84%	7034	234,35	15,56%	8760

Considerando as condições de operações da Classe Recomendada, a cidade de Curitiba (3A) foi a que apresentou maior quantidade de horas de operação do ciclo no ano, totalizando 7034 horas e resultando em uma economia de energia de 168,58 MWh. As cidades de Fortaleza e Manaus (0A) não tiveram horas de operação do ciclo economizador e, portanto, nenhuma economia de energia. As características climáticas das cidades analisadas são mostradas na Tabela C1 do Apêndice C.

Em relação à Classe Recomendada, os resultados indicam que existe uma correlação entre as horas de acionamento do ciclo e a temperatura de orvalho média ( $\overline{T_o}$ ), de forma que quanto menor for a  $\overline{T_o}$  anual maior será a quantidade de horas em que o economizador entrará em operação. Foi possível constatar também o ciclo foi acionado apenas nas cidades onde a  $\overline{T_o}$  anual foi inferior a 20 °C.

Sob as condições de controle da Classe A4, até mesmo as cidades de Fortaleza e Manaus apresentaram horas de operação do economizador. As cidades de Belo Horizonte, Brasília, Porto Alegre, São Paulo e Curitiba operaram com o ciclo ativado na totalidade das horas do ano (8760 horas). As cidades de Fortaleza e Rio de Janeiro ambas obtiveram resultados com horas



de operação superior a 8700 horas. Para estes casos a economia de energia foi em média de 240,28 MWh. Apenas a cidade de Manaus teve operação do ciclo com um número reduzido de horas em relação às demais (8601 horas), atingindo uma economia anual de 181,46 MWh, cerca de 24,5% menos eficiente em relação à média das outras cidades.

Nos casos de simulação sob as condições de controle da Classe A4 pôde-se notar ainda que a influência da  $\overline{T_o}$  anual sobre horas de acionamento do sistema é menos expressiva se comparada à Classe Recomendada. Como exemplo podemos citar a cidade do Rio de Janeiro, com  $\overline{T_o}$  anual de 19,9°C (a terceira mais alta entre as cidades analisadas), onde a economia de energia foi a segunda mais expressiva entre os casos simulados sob as condições da Classe A4.

Pode-se notar em ambas as classes que a economia de energia tem forte relação com o total de horas em que o ciclo economizador permanece em operação, e, portanto, com a entalpia externa no decorrer do ano. Os resultados comprovam ainda que quanto maior for o *setpoint* de temperatura de controle, maior será o número de horas em que o economizador estará em operação, entretanto, o desempenho energético passa a ser mais dependente da umidade relativa. Como exemplo podemos tomar a cidade de Belo Horizonte, onde a  $\overline{UR}$  anual é de 68,6% (a menor entre as cidades analisadas), que apresentou a maior economia de energia sob as condições de controle da Classe A4, mesmo com  $\overline{TBS}$  superior às cidades de Brasília, Porto Alegre, São Paulo e Curitiba, que obtiveram melhor desempenho sob as condições de controle da Classe Recomendada.

Os resultados das simulações reforçam as conclusões do estudo realizado por Amado (2019), que atestam que o parâmetro crítico para determinar o potencial de utilização de estratégias de *free cooling* através da introdução de ar externo diretamente na zona térmica é a temperatura de orvalho. O número de horas de economizador também foi similar para as cidades em comum a ambos os estudos, diferindo apenas devido ao critério de determinação das horas em que o ciclo entra em operação, sendo que a simulação realiza uma comparação entre as entalpias do ar externo e do ar de retorno ao invés de considerar a temperatura de orvalho e temperatura de bulbo seco como fatores independentes.

## 5. CONCLUSÃO

Este estudo teve como objetivo demonstrar por meio de simulação termo energética o potencial da utilização da estratégia de *direct airside free cooling* em data centers, em diferentes climas do Brasil. Para tanto foi utilizado um modelo padronizado de data center simulado com e sem a utilização de um ciclo economizador com controle diferencial de entalpia, sob as condições ambientais da Classe Recomendada e da Classe A4 sugeridas pelo ASHRAE TC 9.9. Foram comparados os resultados do consumo anual de cada sistema que compunha o modelo, em conjunto com as variáveis climáticas de temperatura de bulbo seco, temperatura de orvalho, umidade relativa e entalpia.

Em relação à Classe Recomendada (temperatura de controle interna de 27 °C), os resultados indicaram que a cidade de Curitiba obteve o melhor desempenho, com uma economia de 10,84% representando 168,58 MWh/ano, e o economizador operando por 7034 horas. As cidades localizadas na zona climática 0A (Fortaleza e Manaus) não tiveram nenhuma economia de energia, já que o ciclo não entrou em operação. Isso se deve ao fato de a menor ocorrência horária da entalpia externa ser superior à entalpia interna no decorrer do ano. Foi constatado que, assim como no estudo de Amado (2019), as horas de operação do ciclo sob a Classe Recomendada têm forte relação com a temperatura de orvalho, sendo este parâmetro um bom indicativo do potencial de *free cooling*.

Já em consideração à Classe A4, cujos limites são menos restritivos (temperatura de controle interna de 45 °C), quase todas as cidades simuladas apresentaram operação do ciclo durante a totalidade das horas do ano. Apenas a cidade de Manaus operou com menos de 8700 horas e,

portanto, teve o pior desempenho com uma economia de 11,8% em relação ao caso sem a utilização de *free cooling*. Foi observado que com o parâmetro de controle menos restritivo a relação do total de horas de operação do economizador com a temperatura de orvalho é menos expressiva, ficando mais dependente da condição de umidade do ar externo já que com mais horas de operação o sistema tende a introduzir mais umidade no ambiente interno. A cidade com maior economia sob a Classe A4 foi Belo Horizonte onde a umidade relativa média do ano é de 68,6%, mesmo com a  $\overline{T_o}$  mais elevada em relação às cidades de Curitiba, São Paulo, Porto Alegre e Brasília que tiveram melhor desempenho sob a Classe Recomendada.

Apesar da economia de energia ser expressivamente mais alta em todos os casos simulados com o *setpoint* de controle de temperatura a 45 °C, este valor representa o limite máximo da confiabilidade assegurada pelo ASHRAE TC 9.9. Entretanto, não é a condição mais favorável para operação sistemas mais robustos e em regime de missão crítica, onde a interrupção da disponibilidade das aplicações podem causar consequências severas, tanto financeira quanto socialmente, sendo que a é a Classe Recomendada a que representa as condições de operação do ponto ótimo entre confiabilidade e uso de energia.

Foi verificado ainda que devido à grande carga interna o sistema de aquecimento não entrou em operação em nenhum caso, em nenhuma hora do ano, mesmo para as cidades de clima mais frio e que para todos os casos estudados a necessidade de um sistema de umidificação pôde ser negligenciado, já que em raros casos a umidade relativa do ambiente interno caiu abaixo do limite de controle inferior.

O presente trabalho foi desenvolvido utilizando uma abordagem simplificada e sem levar em consideração outras boas práticas e medidas de eficiência energética, como a gestão do fluxo de ar através da utilização de corredores quentes/frios, e a utilização de materiais de envoltória mais adequados a este tipo de edificação. De toda forma espera-se que os resultados deste estudo possam servir como parâmetro de referência quanto a influência dos climas do Brasil no potencial de economia de energia em data centers utilizando *direct airside economizers*, podendo servir de base para estudos futuros mais detalhados.

### 5.1 Sugestões para trabalhos futuros

Tendo em vista as limitações e simplificações deste estudo sugere-se a abordagem de outros aspectos para refinamento dos resultados em trabalhos futuros levando-se em consideração:

- A utilização da norma ASHRAE 90.4-2019 que traz novas métricas e padrões de eficiência energética com foco em data centers, não cobertos pela norma ASHRAE 90.1-2016 utilizada neste estudo.
- Avaliações do impacto financeiro e energético causado pela utilização de filtros necessários à operação com *direct airside economizers* para cumprir com requisitos de qualidade do ar desconsiderados neste estudo.
- A utilização de materiais de envoltória mais realistas e adequados a esta tipologia de edificação, já que este estudo tomou como base os valores normativos da ASHRAE 90.1-2016.
- Modelagem das estratégias de gestão do fluxo de ar, como corredores quentes/frios e insuflamento por piso elevado, que contribuem para a eficiência energética em data centers.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT. “NBR 15220 - Desempenho térmico de edificações Parte 3: Zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social”. **Associação Brasileira de Normas Técnicas**, 2003.

Aktacir, M. A. “Performance evaluation of different air-side economizer control methods for energy efficient building”. **Journal of Thermal Science and Technology**, v. 32, p. 19-30, 2012.

Amado, E. A. “Free cooling potential for data centers in Brazil”. Tese (Mestrado) – **Departamento de Engenharia Mecânica**, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Rio Grande do Sul, 2019.

ASHRAE. “ANSI/ASHRAE/IES Standard 62.1-2016 – Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality”. **American Society of Heating, Refrigerating and Air-conditioning Engineers**, 2016.

ASHRAE. “ANSI/ASHRAE/IES Standard 90.1-2016 – Energy Standard for Buildings Except Low-Rise Residential Buildings”. **American Society of Heating, Refrigerating and Air-conditioning Engineers**, 2016.

ASHRAE TC 9.9. “ASHRAE Thermal Guidelines for Data Processing Environments”. **Whitepaper**, (Third Edition), 2011.

ASHRAE TC 9.9. “ASHRAE Thermal Guidelines for Data Processing Environments”. **Whitepaper**, (Fourth Edition), 2015.

Cheung, H., Wang, S., Zhuang, C., Gu, J. “A simplified power consumption model of information technology (IT) equipment in data centers for energy system real-time dynamic simulation”. **Applied Energy**, v. 222, p. 329-342, 2018.

**Climate.OneBuilding.Org**, “WMO Region 3 - South America”. <http://climate.onebuilding.org/>. Acessado em 29/09/2020.

**Datacenter.rs World Map**, “Data Centers World Map”. <https://www.datacente.rs/>. Acessado em 28/09/2020.

DOE. “Commercial Prototype Building Models”. **U.S. Department of Energy**, <https://www.energy.gov/eere/buildings/commercial-reference-buildings>. Acessado em 26/09/2020.

DOE. “EnergyPlus”. **U.S. Department of Energy**, <https://energyplus.net/>. Acessado em 09/11/2020.

DOE. “EnergyPlus Input Output Reference”. **U.S. Department of Energy**, 2019.

Goel, S., Athalye, R., Wang, W., Zhang, J., Rosenberg, M., Xie, Y., Hart, R., Mendon, V. “Enhancements to ASHRAE Standard 90.1 Prototype Building Models”. **Pacific Northwest National Laboratory (PNNL)**, Estados Unidos, 2014. Disponível em:

<https://www.pnnl.gov/publications/enhancements-ashrae-standard-901-prototype-building-models>.

Hong, T., Sartor, D., Mathew, P., Yazdanian, M. “Comparisons of HVAC Simulations Between EnergyPlus and DOE-2.2 for Data Centers”. **U.S. DOE Contract No. DE-AC02-05CH11231**, Estados Unidos, 2008.

Lee, K., Chen, H. “Analysis of energy saving potential of air-side free cooling for data centers in worldwide climate zones”. **Energy and Buildings**, v. 64, p. 103-112, 2013.

Niemann, J., Bean, J., Avelar, V. “Economizer Modes of Data Center Cooling Systems”. **Energy and Buildings**, v. 77, p. 364-376, 2014.

Scheller, C., Melo, A.P., Sorgato, M., Lamberts, R. “Análise de arquivos Climáticos para a simulação do desempenho energético de edificações”. **Laboratório de Eficiência Energética Em Edificações**, Universidade Federal de Santa Catarina. Santa Catarina, 2015.

Son, J. E., Lee, K. H. “Cooling energy performance analysis depending on the economizer cycle control methods in an office building”. **Energy and Buildings**, v. 120, p. 45-57, 2016.

Pan, Y., Yin, R., Huang, Z. “Energy modeling of two office buildings with data center for green building design”. **Energy and Buildings**, v. 40, p. 1145-1152, 2008.

Phan, L., Lin, C. “A multi-zone building energy simulation of a data center model with hot and cold aisles”. **Energy and Buildings**, v. 77, p. 364-376, 2014.

Rong, H., Zhang, H., Xiao, S., Li, C., Hu, C. “Optimizing energy consumption for data centers”. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 58, p. 674-691, 2016.

Shehabi, A., Masanet, E., Price, H., Horvath, A., Nazaroff, W. W. “Data center design and location: Consequences for electricity use and greenhouse-gas emissions”. **Building and Environment**, v. 46, p. 990-998, 2011.

Shehabi, A., Smith, S., Sartor, D., Brown, R., Herrlin, M., Koomey, J., Masanet, E., Horner, N., Azevedo, I., Lintner, W. “United States Data Center Energy Usage Report”. **Lawrence Berkeley National Laboratory**. Estados Unidos, 2016.

Zhang, H., Shao, S., Xu, H., Zou, H., Tian, C. “Free cooling of data centers: A review”. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 35, p. 171-182, 2014.

## APÊNDICE A

Tabela A1 - Classificação da zona climática de acordo com a ASHRAE 90.1, Anexo 1-4.

Zona Climática	Nome	HDD/CDD
0	<i>Extremely hot</i>	6000 < CDD10°C
1	<i>Very hot</i>	5000 < CDD10°C < 6000
2	<i>Hot</i>	3500 < CDD10°C < 5000
3	<i>Warm</i>	CDD10°C < 3500 e HDD18°C < 2000
4	<i>Mixed</i>	CDD10°C < 3500 e 2000 < HDD18°C < 3000
5	<i>Cool</i>	CDD10°C < 3500 e 3000 < HDD18°C < 4000
6	<i>Cold</i>	4000 < HDD18°C < 5000
7	<i>Very cold</i>	5000 < HDD18°C < 7000
8	<i>Subarctic/arctic</i>	7000 < HDD18

## APÊNDICE B

Tabela B1 - Requisitos de temperatura e umidade para as classes de operação.

Classe	Limites de TBS [°C]	Limites de Umidade (TO e UR) [°C, %]
Recomendada	18°C a 27°C	-9°C a 15°C & 60%
A1	15°C a 32°C	-12°C & 8% a 17°C & 80%
A2	10°C a 35°C	-12°C & 8% a 21°C & 80%
A3	5°C a 40°C	-12°C & 8% a 24°C & 85%
A4	5°C a 45°C	-12°C & 8% a 24°C & 90%

## APÊNDICE C

Tabela C1 - Características climáticas das cidades simuladas.

	Zona Climática	TBS Média <sup>1</sup> [°C]	UR Média <sup>1</sup> [%]	To Média <sup>1</sup> [°C]	Entalpia Média <sup>2</sup> [kJ/kg]	TBS Máxima <sup>1</sup> [°C]
Fortaleza	0A	26,5	84,8	23,3	74,2	32,2
Manaus	0A	26,7	90,3	24,3	77,4	39,2
Rio de Janeiro	1A	23,6	82,4	19,9	82,4	38,2
Belo Horizonte	2A	22,6	68,6	15,5	51,8	36,1
Brasília	2A	20,7	75,2	15,3	75,2	33
Porto Alegre	2A	19,3	82	15,4	48,8	36,5
São Paulo	2A	18,8	82,1	15	49,6	32,8
Curitiba	3A	16,4	86,5	13,5	44,9	31

<sup>1</sup>Dados dos arquivos climáticos TRY.

<sup>2</sup>Dados simulados com o output *Site Outdoor Air Enthalpy* do EnergyPlus.