



**Universidade do Estado do Rio de Janeiro**

Centro de Tecnologia e Ciências

Faculdade de Engenharia

Marcelo Fernandes Melo Monteiro

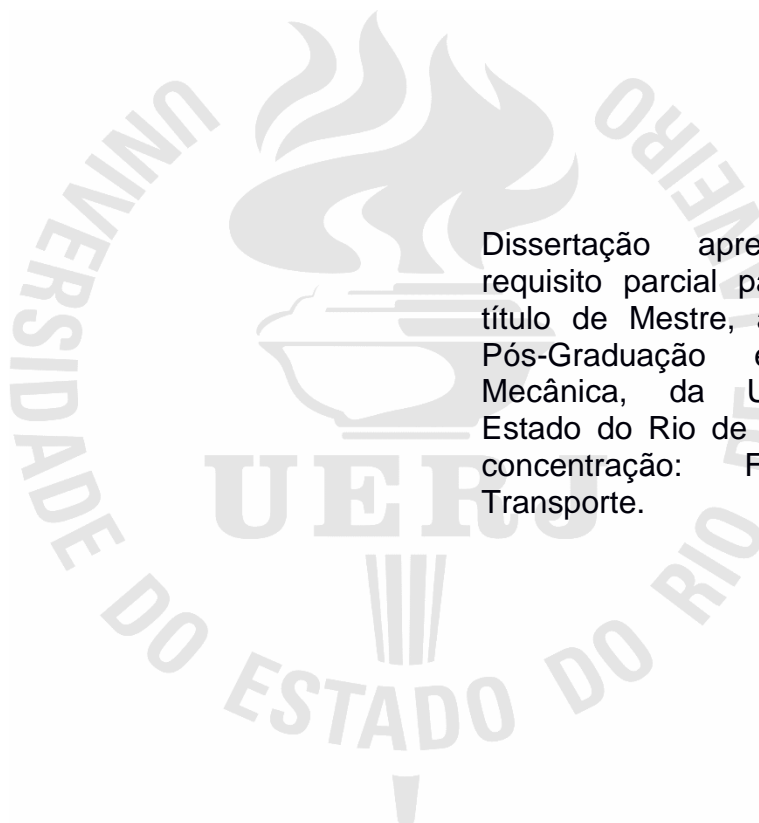
**Avaliação da Influência do Microclima Urbano em Projeto de  
Climatização no Município do Rio de Janeiro**

Rio de Janeiro

2017

Marcelo Fernandes Melo Monteiro

**Avaliação da Influência do Microclima Urbano em Projeto de Climatização no  
Município do Rio de Janeiro**



Dissertação apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Fenômenos de Transporte.

Orientador: Prof. Dr. Manoel Antônio da Fonseca Costa Filho

Rio de Janeiro

2017

CATALOGAÇÃO NA FONTE  
UERJ / REDE SIRIUS / BIBLIOTECA CTC/B

M772 Monteiro, Marcelo Fernandes Melo.  
Avaliação da influência do microclima urbano em projeto de climatização no município do Rio de Janeiro / Marcelo Fernandes Melo Monteiro. – 2017.  
76f.

Orientador: Manoel Antônio da Fonseca Costa Filho.  
Dissertação (Mestrado) – Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Faculdade de Engenharia.

1. Engenharia Mecânica - Teses. 2. Meteorologia - Teses. 3. Ar condicionado - Teses. 4. Clima - Teses. I. Costa Filho, Manoel Antônio da Fonseca. II. Universidade do Estado do Rio de Janeiro. III. Título.

CDU 536.5

Bibliotecária: Júlia Vieira – CRB7/6022

Autorizo, apenas para fins acadêmicos e científicos, a reprodução total ou parcial desta tese, desde que citada a fonte.

---

Assinatura

---

Data

Marcelo Fernandes Melo Monteiro

**Avaliação da Influência do Microclima Urbano em Projeto de Climatização no  
Município do Rio de Janeiro**

Dissertação apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Fenômenos de Transporte.

Aprovado em: 20 de dezembro de 2017.

Banca Examinadora:

---

Prof. Dr. Manoel Antônio da Fonseca Costa Filho (Orientador)  
Faculdade de Engenharia – UERJ

---

Prof. Dr. Americo Barbosa da Cunha Junior  
Instituto de Matemática e Estatística – UERJ

---

Prof. Dr. Daniel José Nahid Mansur Chalhub  
Faculdade de Engenharia – UERJ

---

Prof. Dr. Luiz Cláudio Gomes Pimentel  
Programa de Meteorologia – IGEO – UFRJ

---

Prof. Dr. Nisio de Carvalho Lobo Brum  
Programa de Engenharia Mecânica - COPPE – UFRJ

Rio de Janeiro

2017

## DEDICATÓRIA

Ao meu Pai, onde quer que ele esteja, sempre estará comigo, a minha Mãe, pela paciência, carinho e amor em todos estes anos.

## **AGRADECIMENTOS**

A toda minha família e amigos pelo apoio e pensamento positivo para que esse sonho fosse realizado.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Manoel Antônio da Fonseca Costa Filho por todos os ensinamentos, ajuda e força de vontade, pela excelente orientação e dedicação, dando estímulos para o desenvolvimento deste trabalho e pela amizade demonstrada nesses anos.

Ao Prof. Dr. Luiz Cláudio Gomes Pimentel do Programa de Meteorologia da UFRJ pelo apoio e ajuda ao fornecer dados meteorológicos da REDEMET para essa pesquisa.

Ao instituto INMET pelo envio dos dados meteorológicos e ao ALERTA RIO por disponibilizar os seus dados publicamente no site.

A Carrier, na pessoa do engenheiro Cristiano Brasil, pela cessão gratuita da licença do programa HAP para a UERJ e assim possibilitar o desenvolvimento desta pesquisa.

Aos meus amigos de trabalho, ETU/UFRJ, pela paciência e compreensão nas horas de estudo.

Aos meus colegas de mestrado, pelo companheirismo e pelo inegável apoio quando necessário, em especial o meu amigo Felipe Alfaia e Thamires Bernardes.

A UERJ, porque sem ela não poderia ter realizado este sonho de conquista.

A todos aqueles, que embora não citados nominalmente, contribuíram direta e indiretamente para a execução deste trabalho.

Saber e não fazer, ainda não é saber.

*Lao Tsé*

## RESUMO

MONTEIRO, Marcelo Fernandes Melo. **Avaliação da influência do microclima urbano em projeto de climatização no município do Rio de Janeiro**. 2017. 76f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2017.

As áreas urbanas são caracterizadas por diferentes microclimas identificados pela grande concentração de construções o que ocasiona a formação de ilhas de calor, um aumento da temperatura do ar em comparação com as áreas de baixa ocupação ou rurais. Os projetos de aquecimento, ventilação e ar condicionado (AVAC) necessitam do cálculo de carga térmica, que tem como base as informações das condições ambientais do ar externo, disponibilizadas através da norma: Instalações de Ar Condicionado – Sistemas Centrais e Unitários (ABNT NBR 16401) ou através do banco de dados meteorológicos encontrados nos softwares de projeto de ar condicionado e refrigeração. O objetivo desse trabalho é investigar a influência do microclima urbano no dimensionamento dos projetos para sistema de ar condicionado através do uso de dados climáticos da estação meteorológica mais próxima. O processamento dos dados meteorológicos seguiu as recomendações da *American Society of Heating, Refrigeration and Air-Conditioning* para a criação dos dias típicos de projeto. As simulações requeridas pelo projeto de ar condicionado foram realizadas através do software comercial *Hourly Analysis Program* usando uma mesma edificação inserida em diferentes pontos do Rio de Janeiro. Os resultados mostraram que as cargas térmicas de resfriamento para projetos de ar condicionado para a cidade do Rio de Janeiro podem sofrer um aumento no dimensionamento de até 20% quando são utilizados os dados meteorológicos dos Aeroportos Antônio Carlos Jobim e Santos Dumont.

Palavras-chave: Ar condicionado; Carga Térmica; Dados Climáticos; Microclima; HVAC.

## ABSTRACT

MONTEIRO, Marcelo Fernandes Melo. **Evaluation of influence of urban microclimate on air-conditioning project in the city of Rio de Janeiro**. 2017. 76f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2017.

The urban areas are characterized by different microclimates identified from the high concentration of buildings, which causes the formation of heat islands, an increase of the air temperature compared with the low occupation or rural areas. The heating, ventilation and air-conditioning (HVAC) projects require the calculation of thermal load, which is based on the information of the environmental conditions of the external air, provided through the Brazilian standard: Air Conditioning Installations - Central and Unit Systems (ABNT NBR 16401) or through the meteorological database available in the software for air conditioning design. This work aims at investigating the influence of the urban microclimate on the design of the air conditioning system through the use of climatic data from the closest meteorological station. The processing of the meteorological data followed the recommendations from the American Society of Heating, Refrigeration and Air-Conditioning to create of the project typical days. The simulations requested by the air conditioning project were executed through the commercial software Hourly Analysis Program using the same building inserted at different locations of the Rio de Janeiro. The results showed that the cooling thermal loads in air conditioning projects for the city of Rio de Janeiro can be impacted by an increase of up to 20% when are used the meteorological data from the Antônio Carlos Jobim and Santos Dumont Airports.

Keywords: Air conditioning; Thermal Load, Climatic Data; Microclimate; HVAC.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 01 - Balanço energético Nacional 2016 .....	15
Figura 02 - Representação de ICU.....	17
Figura 03 – Mapa do município do Rio de Janeiro. ....	23
Figura 04 - Mapa de ocupação e uso do solo do município do Rio de Janeiro .....	24
Figura 05 – Visão topográfica da região contendo a RMRJ .....	25
Figura 06 - Direção dos Ventos das estações SBSC, SBGL, SBAF, SBRJ, SBJR ...	26
Figura 07 – Estações meteorológicas da RMRJ. ....	28
Figura 08 – Localização geográfica das estações.....	29
Figura 09 – Distribuição de Frequência.....	30
Figura 10 – Função densidade de probabilidade .....	31
Figura 11 – função de distribuição cumulativa .....	31
Figura 12 – Planta baixa .....	50
Figura 13 – Perfil de ocupação. ....	52
Figura 14 – Perfil da iluminação.....	53
Figura 15 – Perfil dos equipamentos.....	54
Figura 16 – Cargas térmicas de pico para resfriamento.....	60
Figura 17 – Cargas térmicas para o nível de frequência 0,4%.....	60
Figura 18 – Temperaturas de Projeto e Carga Térmica ao nível de frequência de 0,4% .....	61
Figura 19 – Cargas térmicas para frequência 1,0% .....	61
Figura 20 – Temperaturas de Projeto e Carga Térmica ao nível de frequência de 1,0% .....	62
Figura 21 – Cargas térmicas para frequência 2,0% .....	62
Figura 22 – Temperaturas de Projeto e Carga Térmica ao nível de frequência de 2,0% .....	63
Figura 23 – Cargas térmicas de pico para aquecimento .....	64
Figura 24 – Cargas térmicas para frequência 99,6% .....	65
Figura 25 – Temperatura e Carga térmica de 99,6% .....	65
Figura 26 – Cargas térmicas para frequência 99,0% .....	66
Figura 27 – Temperatura e carga térmica de 99,0% .....	66
Figura 28 – Comparação entre as variações de $\Delta T_{md}$ . ....	67

## LISTA DE TABELAS

Tabela 01 - Estações meteorológicas .....	28
Tabela 02 – Fator horário da variação diária de temperatura .....	35
Tabela 03 – Dados meteorológicos utilizados .....	48
Tabela 04 – Zonas térmicas .....	51
Tabela 05 – Taxa de calor liberado por pessoas.....	53
Tabela 06 – Dados de potência de iluminação.....	53
Tabela 07 – Taxa de dissipação de calor dos equipamentos.....	54
Tabela 08 – Vazão de ar externo .....	55
Tabela 09 – Temperaturas de projeto da estação Ecológica Agrícola (°C).....	56
Tabela 10 – Temperaturas de projeto da estação Marambaia (°C).....	56
Tabela 11 – Temperaturas de projeto da estação Forte de Copacabana (°C).....	57
Tabela 12 – Temperaturas de projeto da estação Aeroporto dos Afonsos (°C) .....	57
Tabela 13 - Temperaturas de projeto da estação Aeroporto de Santa Cruz (°C).....	57
Tabela 14 – Temperaturas de projeto da estação São Cristóvão (°C) .....	57
Tabela 15 – Temperaturas de projeto da estação Vila Militar (°C) .....	58
Tabela 16 – Temperaturas de projeto da estação Aeroporto Internacional Antônio Carlos Jobim (°C) .....	58
Tabela 17 – Temperaturas de projeto da estação Aeroporto Santos Dumont (°C) ...	59
Tabela 18 – Parede externa de alvenaria de 200 mm.....	75
Tabela 19 – Parede interna de alvenaria de 150 mm.....	75
Tabela 20 – Telhado .....	76
Tabela 21 – Composição da janela .....	76
Tabela 22 – Composição da porta exterior .....	76

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ANVISA	Agência Nacional de Vigilância Sanitária
ALERTA RIO	Sistema Alerta Rio da Prefeitura do Rio de Janeiro
ASHRAE	American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers
AVAC	Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado
CEPERJ	Fundação Centro Estadual de Estatísticas, Pesquisas e Formação do Estado do Rio de Janeiro
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
TMY	Ano Meteorológico Típico
HAP	Hourly Analysis Program
ICU	Ilha de Calor Urbano
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
REDEMET	Rede de Meteorologia do Comando da Aeronáutica
RMRJ	Região Metropolitana do Rio de Janeiro
SBAF	Aeroporto dos Afonsos
SBJR	Aeroporto de Jacarepaguá
SBSC	Aeroporto de Santa Cruz
SBRJ	Aeroporto Santos Dumont
VAV	Volume de Ar Variável

## LISTA DE SÍMBOLOS

A	Área, em m <sup>2</sup> .
A <sub>s</sub>	Irradiação solar aparente na ausência de massa de ar, em W/m <sup>2</sup> .
ACN	Coeficiente de clareza da atmosfera.
B	Coeficiente de extinção atmosférica
BF	Fator de “by-pass”, adimensional.
c <sub>p</sub>	Calor específico, kJ/kg.°C.
ET	Fator da diferença entre hora local, h
E <sub>dir</sub>	Radiação direta
E <sub>dif</sub>	Radiação difusa
E <sub>o</sub>	Radiação solar
F <sub>area</sub>	Fator de vazão volumétrica por área, em L/s.m <sup>2</sup> .
F	Vetor de frequência, adimensional.
F <sub>h</sub>	Fator de temperatura horário, adimensional.
F <sub>o</sub>	Programação de ocupação da edificação, em %.
F <sub>perda</sub>	Fator de perda de calor nos dutos, em %.
F <sub>Pessoas</sub>	Fator de vazão volumétrica por pessoas, em L/s.pessoas.
F <sub>s</sub>	Fração da área da janela que é protegida da luz solar direta
FDC	Função de distribuição cumulativa
FDP	Função densidade de probabilidade
h	Entalpia específica, kJ/kg.
h <sub>e</sub>	coeficiente de transferência de calor por convecção externo, W/m <sup>2</sup> .K
HG	Ganho de calor sensível e latente por pessoa, em W/pessoa
HL	Hora local, em hora.
I	Intensidade do raio solar, em W/m <sup>2</sup> .
IAC	Coeficiente de atenuação solar interior direto ou difuso da janela
L	Longitude, em graus.
ṁ	Vazão mássica, em kg/s.
m <sup>a</sup>	Exponentes de massa do ar das radiações direta ou difusa
N <sub>dia</sub>	Dia do ano.
N <sub>i</sub>	Fração de radiação solar que é absorvida

$N_{\text{Pessoas}}$	Número de pessoas.
$N_{\text{trocas}}$	Número de trocas de ar por hora.
P	Pressão, em Pa.
$p_g$	Grau de refletividade do solo.
$\dot{q}$	Fluxo de calor, W/m <sup>2</sup> .
$\dot{Q}$	Quantidade de calor, em kW.
SC	Coeficiente de sombreamento.
SHGC	Coeficiente de ganho de calor solar direto ou difuso da janela.
T	Temperatura, em °C ou K.
TBS	Temperatura de Bulbo Seco, em °C.
TBU	Temperatura de Bulbo Úmido, em °C.
TPO	Temperatura de orvalho, em °C.
TSA	Tempo solar aparente, em hora.
$\Delta T_{md}$	Média das amplitudes diária da temperatura do mês mais quente.
U	Coeficiente global de transferência de calor, em W/(m <sup>2</sup> .°C).
UR	Umidade relativa.
V	Velocidade, em m/s.
$\dot{V}$	Vazão volumétrica, em m <sup>3</sup> /s ou L/s.
Vol.	Volume, em m <sup>3</sup> .
W	Potência do trabalho líquido, em kW.
Y	Razão entre o fluxo difusivo da superfície vertical e horizontal.
$\beta$	Ângulo da altitude solar, em graus.
$\alpha$	fator de absorção à radiação solar da superfície
$\epsilon$	Ângulo de inclinação para a superfície do edifício, em graus.
$\eta$	Eficiência.
$\rho$	Massa específica, kg/m <sup>3</sup> .
$\omega$	Umidade absoluta, em $g_{\text{vapor d'água}}/kg_{\text{ar}}$ .
$\tau$	Profundidades ópticas das radiações direta e difusa.

## SUMÁRIO

<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>14</b>
Motivação .....	14
Objetivo .....	19
Estrutura do trabalho .....	19
<b>1. REVISÃO DE LITERATURA</b> .....	<b>20</b>
<b>2. MATERIAIS E FUNDAMENTOS</b> .....	<b>23</b>
2.1. Características Geográficas do Município do Rio de Janeiro .....	23
2.2. Estações Meteorológicas Utilizadas .....	27
2.3. Distribuições de Frequência e Cumulativa .....	29
2.4. Dados Meteorológicos para Projetos de AVAC .....	32
2.5. Cálculo das Condições de Projeto Segundo a ASHRAE (2013) .....	33
2.6. Preenchimento de Dados Ausentes e Representatividade dos Dados Meteorológicos Segundo a ASHRAE (2013).....	36
2.7. Projeto de Sistema de AVAC Através do <i>Hourly Analysis Program</i> .....	37
2.8. Ventilação e Renovação de Ar .....	46
<b>3. METODOLOGIA</b> .....	<b>48</b>
3.1. Cálculo das Temperaturas de Projeto .....	48
3.2. Cálculo da Carga Térmica .....	49
<b>4. RESULTADOS</b> .....	<b>56</b>
4.1. Temperaturas de Projeto .....	56
4.2. Carga Térmica de Resfriamento.....	59
4.3. Carga Térmica de Aquecimento .....	64
4.4. Variação Máxima de Temperatura.....	67
<b>5. CONCLUSÕES</b> .....	<b>68</b>
5.1. Considerações Finais .....	68
5.2. Trabalhos Futuros.....	69
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>70</b>
<b>APÊNDICE A – Propriedade térmica dos materiais</b> .....	<b>75</b>

## INTRODUÇÃO

### Motivação

O consumo de energia indica o desenvolvimento econômico e o nível de qualidade de vida da sociedade. Ele reflete todas as atividades industriais, comerciais e de serviços, além de avaliar a capacidade da população para adquirir bens e serviços com certos valores tecnológicos, que exigem acesso à rede elétrica, aumentando o consumo de energia (ANEEL, 2008).

Os setores que mais demandam eletricidade no Brasil são: industrial, residencial, comercial e público. Juntos eles consomem cerca de 75% do total de energia usada no país, além disso, 15,1% da energia está associada a perdas, o que supera o gasto com energia do setor comercial e público segundo o Balanço Energético Nacional (EPE, 2017). No caso dos empreendimentos comerciais, o sistema de aquecimento, ventilação e ar condicionado (AVAC) é responsável por 30% a 40% do consumo de energia elétrica (Danfoss, 2015). A figura 01 mostra o balanço e o consumo energético de todos os setores do Brasil.

O crescimento acentuado do consumo de energia, embora possa espelhar o aquecimento econômico e a melhoria da qualidade de vida, tem consequências negativas. Uma delas é a possibilidade de escassez dos recursos utilizados para a produção de energia. Além do impacto ao meio ambiente derivado dessas atividades e os elevados investimentos necessários na pesquisa de novas fontes e criação de novas usinas (ANEEL, 2008).

Atualmente, o meio mais moderno e difundido no mundo para conter a crescimento do consumo sem alterar a qualidade de vida e o desenvolvimento econômico é o estímulo ao uso eficiente de energia. O incentivo pode vir através de sistemas de certificação, selos e etiquetas dos empreendimentos construídos ou projetados e a modernização dos sistemas existentes para possibilitar a redução do consumo de energia a partir de soluções eficientes. O uso de equipamentos de climatização mais sustentáveis representa investimentos iniciais mais altos, mas são responsáveis por menores custos de operação e diminuição do consumo de energia (Danfoss, 2015).

Para adotar uma mudança ou solução energética mais eficiente é necessário conhecer o comportamento do clima da região. O clima urbano tem como característica a temperatura do ar mais elevada do que a das zonas rurais

circundantes. Como consequência, a temperatura ambiental interna será relativamente maior do que a temperatura exterior. Deste modo, sem sistemas mecânicos de controle térmico, as condições ambientais internas podem afetar negativamente a saúde dos ocupantes e a produtividade (Mochtar, 2013). Assim, a maioria dos edifícios em uma área urbana depende de sistemas de condicionamento de ar para alcançar os níveis necessários de conforto e saúde.

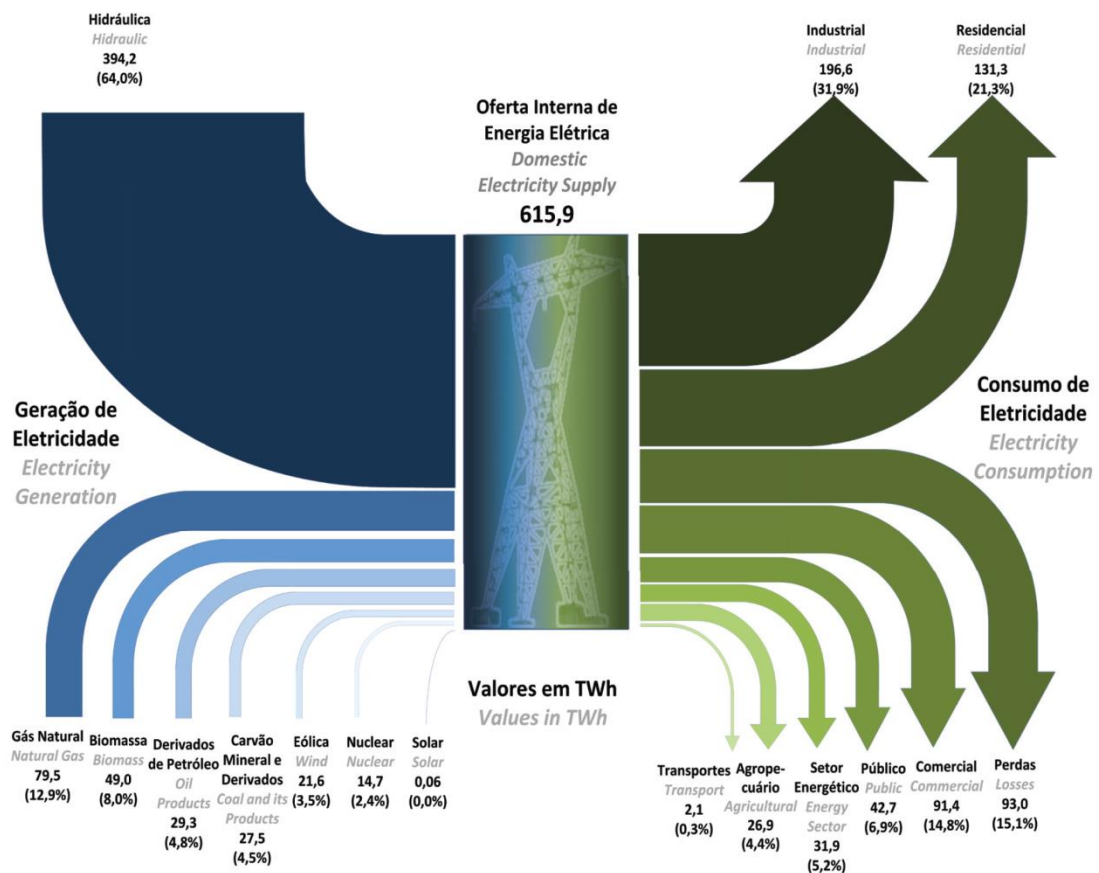


Figura 01 - Balanço energético Nacional 2016 (EPE, 2017).

A qualidade do ar interno obtida por taxas adequadas de renovação de ar e a utilização de filtros para o tratamento do ar e retenção de particulados são fatores importantes para a saúde dos ocupantes dos edifícios. Ambientes isolados e com pouca infiltração de ar externo podem reduzir o consumo de energia dos sistemas de AVAC, que só teriam que retirar a carga térmica do espaço ocupado. O resultado disso é o aumento substancial da concentração de poluentes no ar interno: dióxido de

carbono, monóxido de carbono, óxidos de enxofre e nitrogênio, que são produzidos pelo metabolismo humano, por materiais de limpeza e materiais de construção a base de solvente, além do aparecimento de mofo e bolor. Tais poluentes comprometem a saúde e o rendimento do trabalho dos usuários (Carmo, 1999).

O clima pode ser definido como o conjunto de condições atmosféricas, característico de uma determinada região geográfica. Regiões equatoriais recebem mais energia que as áreas mais próximas aos polos. Regiões de clima tropical são caracterizadas como alta umidade, chuva excessiva e grande incidência solar. As variáveis climáticas são observadas através do aumento da temperatura da superfície, elevação do nível do mar, aumento de precipitação, e condições meteorológicas extremas.

As áreas urbanas formam um sistema complexo de profundas alterações nos parâmetros atmosféricos, que envolve a circulação, a turbulência e a dispersão do ar, além da estocagem de calor, da evapotranspiração e do balanço de energia na superfície (Kanda, 2006). As cidades também emitem gás carbônico devido à utilização de combustíveis, da geração de energia nos processos industriais, nos sistemas de transporte e na construção civil.

A estruturação das áreas urbanizadas diminui a velocidade média do vento e reduz a remoção de calor dentro dos centros urbanos. Na realidade, o que dificulta a troca térmica são os chamados *canyons* urbanos formados por prédios e áreas de recirculação. Além disso, o ganho de calor também é afetado pelo aumento da população e menor evaporação devido à redução de áreas verdes. A cidade apresenta o ciclo diurno da temperatura do ar reduzido devido a uma maior superfície com grande capacidade retenção do calor, assim aumentando a inércia térmica efetiva (Erell, 2007).

As mudanças climáticas globais ou as mudanças em escala local podem ser as causas associadas aos episódios de extremos de temperatura (Voogt, 2002). Na escala local, muitas mudanças estão ligadas a forma heterogênea das cidades, que interferem expressivamente no balanço térmico e hídrico da superfície urbana. Outros fatores locais como a proximidade de áreas planas ou montanhosas e perto de rios, lagos ou do mar influenciam as condições climáticas de uma determinada região e formam os chamados microclimas (Szokolay, 2008).

O aumento da temperatura do ar das áreas periféricas (áreas rurais) em direção às áreas urbanizadas gera um gradiente horizontal de temperatura definido como ilha

de calor (Oke, 1982). As ilhas de calor urbano (ICU) são uma consequência do clima urbano e uma modalidade das mudanças climáticas, causadas por fatores humanos e produzidos em escala local, necessitam de investigação para sua detecção e entendimento (Oke, 1987). A ilha de calor está associada à mudança na cobertura da superfície (urbana) e o estudo e a previsão dos efeitos das ilhas de calor são importantes para um melhor planejamento urbano e, conseqüentemente, para a redução das causas do desconforto térmico e dos problemas na saúde (Bueno et al., 2014).

Várias características das zonas urbanas podem contribuir para a formação de ICU: formas específicas das estruturas verticais urbanas, capacidade térmica relacionada com materiais de construção, diminuição da evaporação devido à redução de áreas com cobertura vegetal e do transporte de água da chuva através de redes pluviais, produção de energia antropogênica, através da emissão de calor pelas indústrias, equipamentos e habitações, maior absorção de radiação pelos poluentes da atmosfera urbana e aprisionamento de radiação nas ruas e vales urbanos (Oke, 1987). Uma representação esquemática de ICU é apresentada na Figura 02.

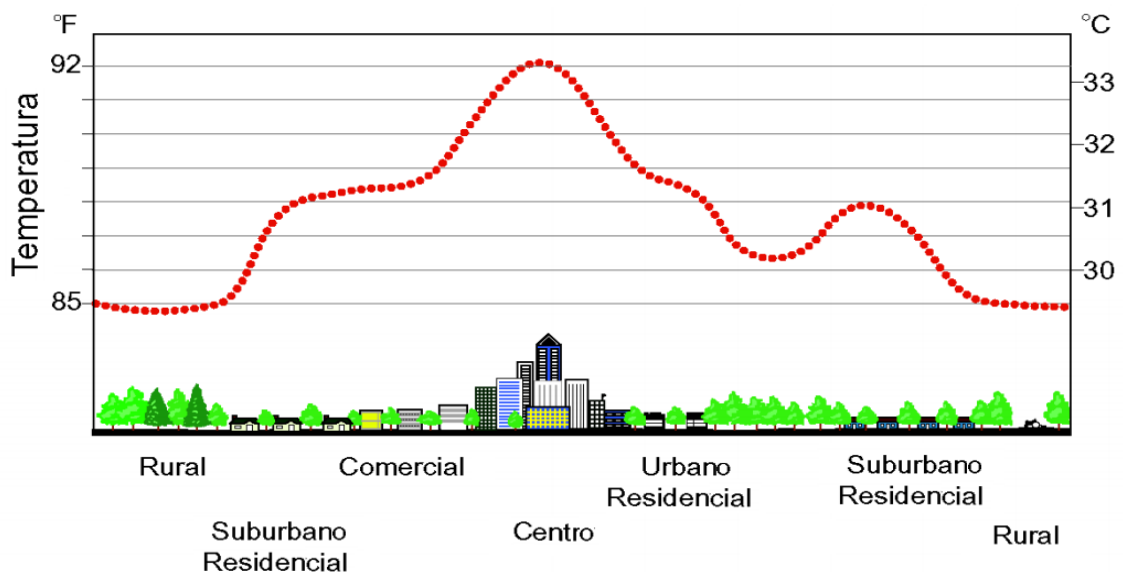


Figura 02 - Representação de ICU. (Fonte: adaptada de Santamouris, 2001)

As ilhas de calor ganham uma ampla representação nos seguintes eixos: ambiental, os núcleos mais quentes das ilhas de calor podem acarretar danos à saúde e à produção humana, além da flora e à fauna; econômico, as áreas mais quentes gastam mais energéticos, como por exemplo, a utilização mais frequente de

condicionadores de ar; cultural, ocorre uma separação socioespacial na localização dos imóveis e classes sociais, sendo aqueles mais próximos a áreas verdes são mais valorizados e são destinados às classes média alta da sociedade; político, motivo de divergências e discussões entre poder público e especialistas ambientais pela aprovação e licenciamento de empreendimentos imobiliários, como a verticalização da orla (Lucena, 2012).

A rápida urbanização ganhou maior atenção pois impacta nas questões ambientais, afetando no conforto térmico interior e exterior e no aumento do uso de energia para aquecimento e refrigeração. Nas áreas urbanas as condições ambientais internas para conforto térmico são essenciais para a qualidade de vida. O conforto térmico humano depende diretamente da temperatura, da velocidade do ar, da umidade, da quantidade de roupas usadas, da taxa metabólica e do nível de atividade física (Li et al., 2010).

Temperatura do ar é tradicionalmente monitorada por instrumentos meteorológicos estacionários chamados de estações meteorológicas, que fornecem dados com bastante precisão por longos períodos temporais, geralmente registrados numa base horária. O mais importante é a sua representatividade espacial (Theophilou, 2015). A maioria dos dados observados com o objetivo de calcular as condições de projeto são recolhidos de locais de monitoramento dos aeroportos. A maioria dos quais são planos, gramados, com áreas abertas, longe de edifícios e árvores ou outras influências locais. As temperaturas registradas nestes locais podem ser significativamente diferentes de locais construídos onde as condições de projeto estão sendo aplicadas (Oke, 1987).

As diferenças de temperatura dos ambientes urbanos dependem da posição geográfica, hora do dia, estação do ano, velocidade do vento e cobertura de nuvens. A geração de conjuntos de dados do clima adequados numa base horária, contendo todos os parâmetros climáticos relevantes, é crucial para a avaliação do impacto da ilha de calor urbana sobre a demanda de energia nos edifícios (Theophilou, 2015).

Para a cidade do Rio de Janeiro, a norma brasileira de projeto de sistemas de condicionamento de ar, ABNT NBR 16401, disponibiliza dados climáticos dos Aeroportos Santos Dumont e Internacional Antônio Carlos Jobim, que se situam junto a Baía de Guanabara, e portanto, são dados não representativos de todas as regiões do Município. O município do Rio de Janeiro é uma área altamente complexa em

virtude do seu espaço, morfologia, ocupação urbana e de sua circulação atmosférica com características singulares que resultam em diferentes microclimas.

Uma estação meteorológica com um longo período de registro, quando localizada na proximidade de um local de construção, oferece aos engenheiros um recurso único para calcular as condições meteorológicas de projeto.

### **Objetivo**

A presente dissertação tem como objetivo investigar a influência da variabilidade espacial das condições climáticas no município do Rio de Janeiro sobre o cálculo da carga térmica para projeto e dimensionamento de AVAC, através do processamento de dados das estações meteorológicas disponíveis nesta região.

Para tal finalidade, foi utilizada uma mesma edificação que foi virtualmente deslocada para as posições das estações meteorológicas, sempre mantendo-a na mesma orientação geográfica.

### **Estrutura do trabalho**

No capítulo 1 é apresentada uma revisão de literatura relacionando trabalhos sobre ilhas de calor urbanas e sobre o impacto de uma nova análise de dados meteorológicos sobre o dimensionamento de sistemas de condicionamento de ar.

No capítulo 2 são apresentadas as características geográficas do município do Rio de Janeiro que foi utilizado como estudo de caso, com informações sobre as estações meteorológicas utilizadas, a metodologia empregada no processamento dos dados meteorológicos e uma descrição detalhada do software utilizado para o cálculo de carga térmica.

No capítulo 3 é apresentada uma descrição passo a passo do processamento para o cálculo das temperaturas de projeto e informações sobre os dados inseridos no programa para o cálculo da carga térmica.

No capítulo 4 são apresentados e analisados os resultados, comparando dados de temperaturas de projeto com carga térmica calculada.

No capítulo 5 são apresentadas as conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

## 1. REVISÃO DE LITERATURA

Tradicionalmente, a ASHRAE vem pesquisando e atualizando os critérios de tratamento dos dados meteorológicos para o projeto de sistemas de climatização, com sucessivas publicações de novas edições do ASHRAE Handbook Fundamentals desde a primeira edição em 1967, sempre atualizando e ampliando o conjunto de dados climáticos disponíveis.

Landsberg (1956) observou que as temperaturas médias anuais no centro urbano da cidade de Londres eram superiores em comparação com a redondeza. Em relação a umidade relativa e a velocidade do vento foi observada uma redução de 6% e 25%, respectivamente.

Costa (1998) analisou dados de estações meteorológicas da cidade de Belém e observou o comportamento da ilha de calor durante períodos chuvosos e menos chuvosos. Os resultados mostraram que a ilha de calor atingiu diferenças de temperatura em torno de 4,5°C entre os bairros urbanizados e a área rural. No período chuvoso esta diferença caiu para 2,0°C, mostrando que os efeitos de nebulosidade e precipitação proporcionaram menores contrastes térmicos entre os diferentes ambientes urbanos e rurais.

Bulut et al. (2002) determinaram as condições de projeto do ar externo de 78 locais dentro da Turquia utilizando dados de estações meteorológicas em cada um desses locais durante o período de 13 anos. As temperaturas de bulbo seco para projeto foram calculadas no formato recomendado pela ASHRAE através das frequências cumulativas de 0,4%, 1,0% e 2,0%. As condições de projeto analisadas foram utilizadas para o cálculo de carga térmica de refrigeração das 78 localidades. Os autores concluíram que as condições externas de projeto vigentes são muito rigorosas.

Gedzelman *et al.* (2003) utilizaram uma série temporal de dois anos seguidos (1997-1998) em 50 estações meteorológicas para a cidade de *New York*. As ilhas de calor observadas eram formadas no final da tarde e desapareciam logo após o amanhecer. A temperatura média ficou em torno de 4°C acima no verão e no outono e cerca de 3°C acima no inverno e na primavera.

Aktacir et al. (2008) analisaram as influências de diferentes condições do ar externo no dimensionamento e no consumo de energia de um sistema de condicionamento de ar localizado em Adana na Turquia. Utilizando a condições de

projeto da ASHRAE eles verificaram que a carga térmica de resfriamento é dependente das condições externas do ar. Para o prédio em estudo, cerca de metade da carga térmica dependia das características da construção.

Chen e Yu (2009) analisaram as causas do superdimensionamento dos picos nos cálculos de carga térmica de resfriamento utilizando os dados meteorológicos de projeto recomendados pela ASHRAE para Hong Kong. As condições de projeto selecionadas indicavam temperaturas de bulbo seco, temperaturas de bulbo úmido e radiação solar que não ocorriam coincidentemente, desta forma superestimavam os equipamentos selecionados. A estudo demonstrou que a radiação solar horizontal variava de 4% a 20%, dependendo do mês. O pico de carga térmica de resfriamento calculado com as condições climáticas tradicionais era superior em 12% a 50% quando comparado com as novas condições climáticas propostas de projeto.

Marques Filho *et al.* (2009) analisando a características físicas da cidade do Rio de Janeiro com relação ao clima destacam a importância dos estudos de climatologia urbana em países tropicais que se mostram bastante diferentes dos países com climas temperados do hemisfério norte.

Karam *et al.* (2010) simularam episódios da ilha de calor diurna na região metropolitana do Rio de Janeiro através de uma modelagem meteorológica urbana e analisando os dados verificaram uma variação dinâmica das ilhas de calor e onde os períodos de pico são registrados.

Silva (2010) comparou a variação de temperatura na Região Metropolitana do Rio de Janeiro entre as estações meteorológicas do aeroporto dos Afonsos e da Ecologia Agrícola em Seropédica. A maior diferença de temperatura entre as duas estações ocorreu no período da madrugada e o valor foi de aproximadamente 4 °C. O autor concluiu que esta elevação de temperatura na madrugada é uma consequência direta do aprisionamento de calor na região urbana.

Oleson *et al.* (2011) observaram um pequeno acréscimo em intensidade na ilha de calor em um estudo sobre a influência dos aparelhos de ar condicionado no aquecimento urbano. Em um modelo climático global da ilha de calor verificaram um aumento de 0,01W/m<sup>2</sup> de calor distribuído globalmente devido a utilização de aparelhos de ar condicionado.

Verbai *et al.* (2015) pesquisaram as temperaturas de projeto para aquecimento de edifícios em toda a Hungria. No estudo foram usados dados das temperaturas de bulbo seco do ar nos últimos 50 anos para construção de gráficos de distribuição de

frequência cumulativa para um novo valor de projeto para a frequência 99% com nível de confiança de 99,5%. Os novos valores de projeto reduziram o custo de investimento em aproximadamente 10% para grandes edifícios e a economia de energia em operação intermitente chegou a 6%.

## 2. MATERIAIS E FUNDAMENTOS

### 2.1. Características Geográficas do Município do Rio de Janeiro

O município do Rio de Janeiro é cercado pelo mar em quase todo o seu entorno, somente a parte norte faz ligação com outros municípios da região metropolitana do Rio de Janeiro, como ilustrado na figura 03: Duque de Caxias, Nilópolis, Nova Iguaçu, São João de Meriti, Seropédica, Mesquita e Itaguaí (CEPERJ, 2013).

O município do Rio de Janeiro tem uma alta densidade populacional e um alto grau de industrialização, o que é um indicativo de grande concentração de emissores de poluentes e fontes de calor, além disto, existem as particularidades topográficas e atmosféricas que afetam diretamente a dispersão de calor e dos poluentes na atmosfera. Junto a isto, o município do Rio de Janeiro apresenta um acelerado processo de degradação e assoreamento dos rios, destruição dos solos e desmatamento (Moura et al., 1998).

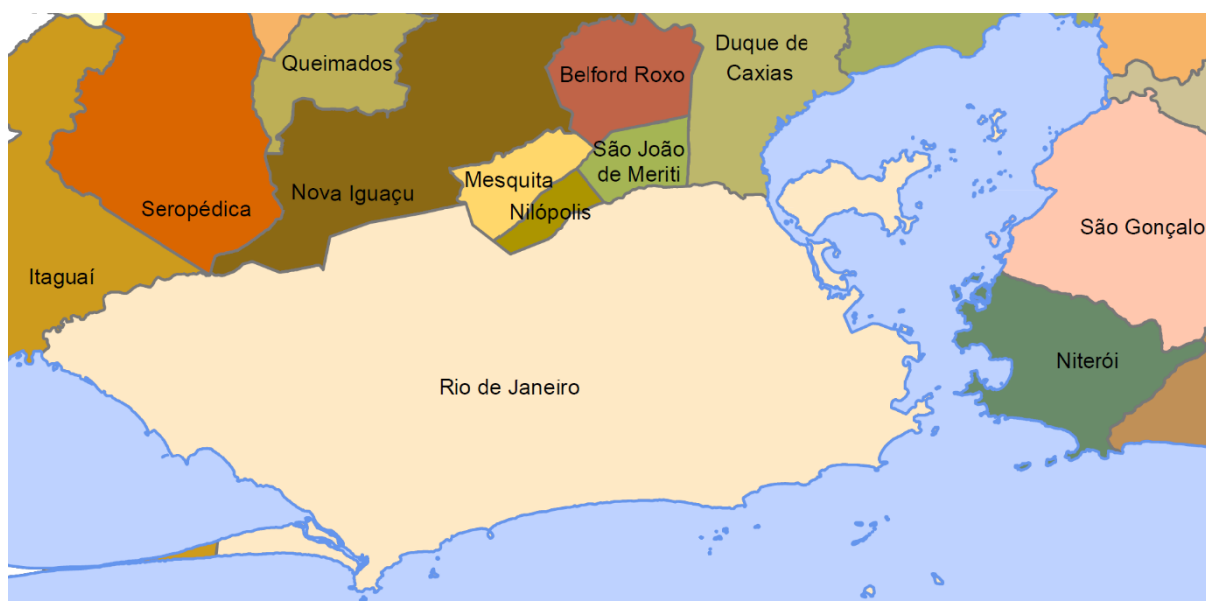


Figura 03 – Mapa do município do Rio de Janeiro.

Na região metropolitana do Rio de Janeiro podem ser encontrados dois perfis topográficos principais: as montanhas e as baixadas. No relevo montanhoso incluem as serras, morros e os maciços da Tijuca, Pedra Branca e Gericinó-Mendanha. Estes relevos são responsáveis pela divisão da cidade e a criam diversos microclimas naturais que influenciam na circulação dos ventos e nos meios de transportes e

dispersão de poluentes atmosféricos, além de influenciarem a ampliação e o sentido do crescimento urbano (Farias, 2007).

O maciço da Tijuca apresenta uma orientação paralela a linha da costa e separa a zona sul, a zona norte e a baixada de Jacarepaguá. O Maciço da Pedra Branca é localizado na zona oeste do município do Rio de Janeiro e abriga o Pico da Pedra Branca, o ponto mais alto da Cidade. O maciço de Gericinó-Mendanha, além de ter parte de sua área pertencente ao município do Rio de Janeiro, tem ao seu redor os municípios de Nova Iguaçu, Mesquita e Nilópolis. A figura 04 mostra o relevo e a ocupação do solo do município do Rio de Janeiro.

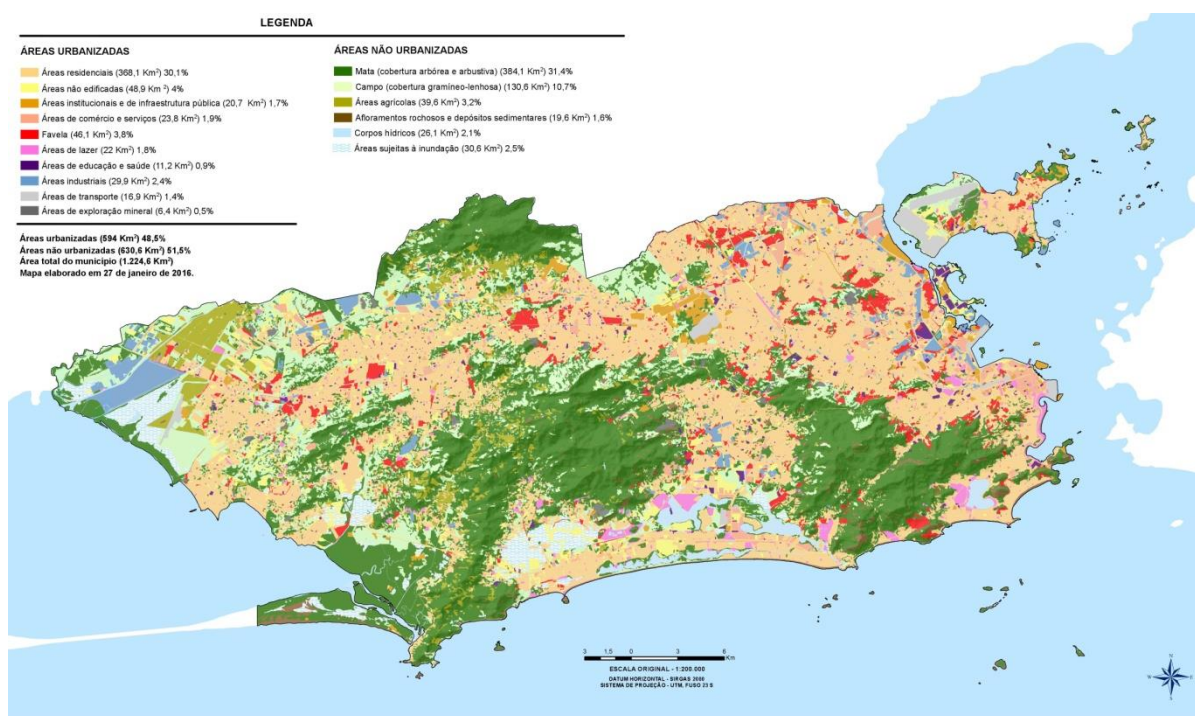


Figura 04 - Mapa de ocupação e uso do solo do município do Rio de Janeiro. (Fonte: Prefeitura do Rio, 2015)

A localização dos maciços da Tijuca, Pedra Branca e Gericinó-Mendanha, demarcando áreas de baixada cercadas de pequenas serras e morros isolados, além da existência do mar e das baías da Guanabara e Sepetiba enfatizam as diferenças presentes no comportamento do vento em diversos pontos da Região Metropolitana do Rio de Janeiro (RMRJ), a figura 05 mostra os maciços. Analisando o padrão horário dos ventos de alguns aeroportos, fica evidente a atuação do sistema de brisa

marítima-terrestre que se mostra mais destacado nas proximidades da faixa litorânea (Guimarães, 2014).

Pimentel et al (2014) apresentaram um estudo com informações combinadas considerando a direção e intensidade do vento na RMRJ, utilizando os dados de estações meteorológicas em diversos pontos da cidade e mostrando como a orientação da linha de costa litorânea influencia no padrão das circulações locais do vento. No aeroporto de Santa Cruz (SBSC) são observados ventos preferenciais na direção Nordeste/Sudoeste, no aeroporto Santos Dumont (SBRJ) são mais frequentes na direção Norte/Sul, destacando a relação existente entre a localização relativa à costa e a orientação dos ventos.

Nos aeroportos de Santa Cruz e Santos Dumont, com suas localizações próximas da costa, conclui-se que a modulação da circulação local dos ventos formados pelas brisas marítimas e terrestres são aproximadamente perpendiculares ao perímetro da costa e são conduzidos ao longo da topografia existente na RMRJ. A figura 06 mostra a rosa dos ventos de alguns aeroportos do Rio de Janeiro.



Figura 05 – Visão topográfica da região contendo a RMRJ. (Fonte: EMBRAPA, 2017)

As estações localizadas mais no interior do continente, como a do aeroporto dos Afonsos (SBAF), são mais influenciadas pela elevação e a irregularidade do terreno e a presença dos maciços da Pedra Branca e da Tijuca que realizam um efeito canalizador dos ventos. Para o aeroporto de Jacarepaguá (SBJR) e o aeroporto dos

Afonso há a formação de um corredor de ventos com prevalência nas direções Norte-Sul para o aeroporto de Jacarepaguá (SBJR) e uma acentuação na direção Sul para o aeroporto dos Afonsos (SBAF).

O aeroporto dos Afonsos (SBAF) é o que apresenta o maior percentual de calma em comparação com os outros aeroportos analisados, principalmente durante a madrugada. Os efeitos do relevo sobre o escoamento atmosférico devem ser considerados a fim de justificar o regime de ventos entre o setor oeste da RMRJ em relação aos setores central e leste da região.

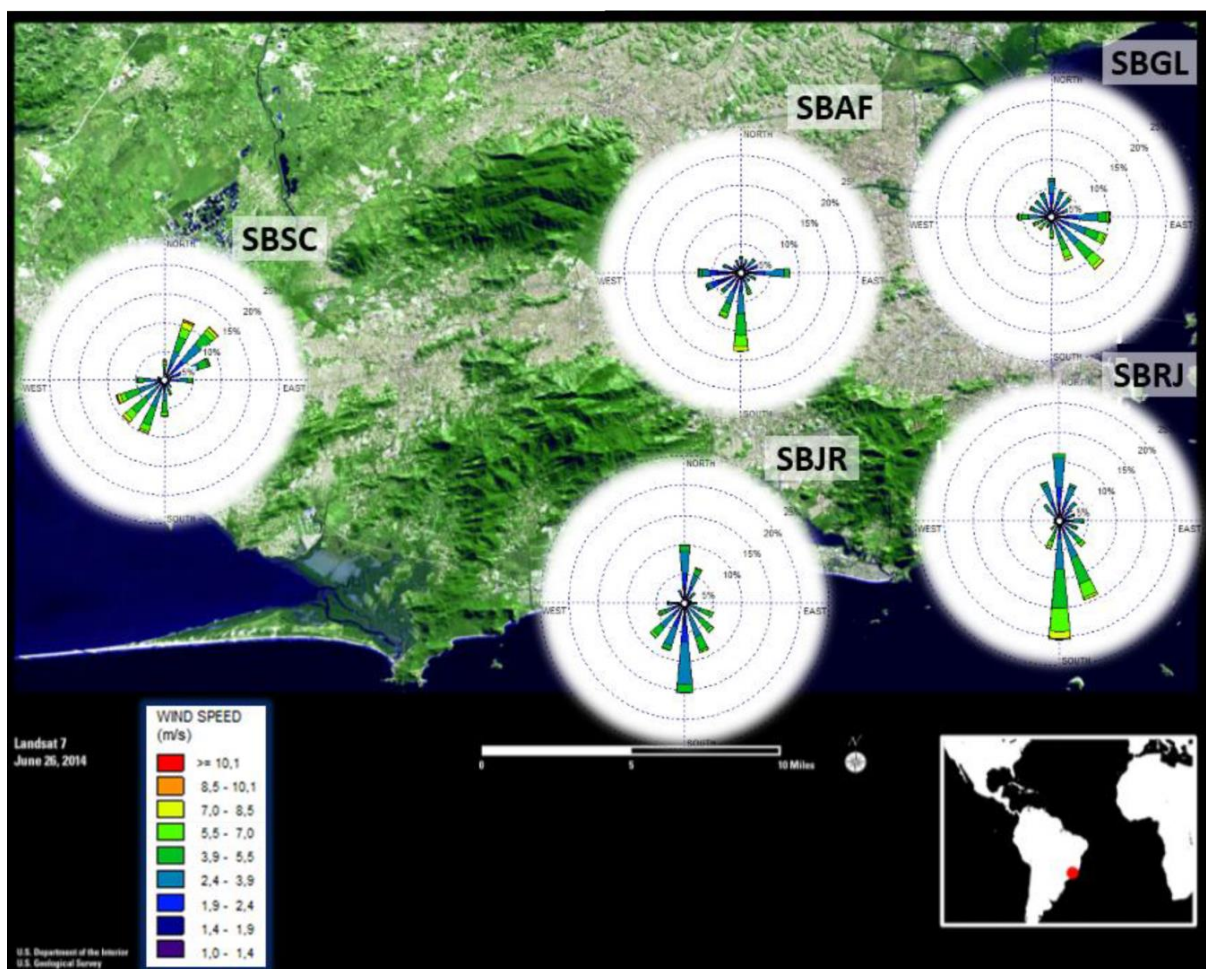


Figura 06 - Direção dos Ventos das estações SBSC, SBGL, SBAF, SBRJ, SBJR. (Fonte: Guimarães, 2014)

## 2.2. Estações Meteorológicas Utilizadas

Uma estação coleta as informações meteorológicas representativas da área em que está localizada. O conjunto dos dados recebidos é validado, através de um controle de qualidade e armazenado em um banco de dados. A coleta dos dados é feita através de sensores para medição dos parâmetros meteorológicos a serem observados. As medidas são coletadas em intervalos de tempo diferentes entre os diversos modelos de estações e sistema de aquisição de dados. Geralmente, a cada hora, estes dados são integralizados e disponibilizados para serem transmitidos e guardados. Os dados mais frequentes são:

- Temperatura do ar;
- Umidade relativa do ar;
- Temperatura do ponto de orvalho;
- Pressão atmosférica;
- Velocidade do vento;
- Direção do vento;
- Radiação Solar;
- Precipitação acumulada no período.

Neste trabalho foram usados dados das estações meteorológicas convencionais dos aeródromos da Rede de Meteorologia do Comando da Aeronáutica (REDEMET), das estações meteorológicas automáticas de responsabilidade do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) e das estações meteorológicas do Sistema Alerta Rio da Prefeitura do Rio de Janeiro (ALERTA RIO). A Tabela 01 apresenta a relação e a localização destas estações. Todas estão dentro do município do Rio de Janeiro, com exceção da estação Ecológica Agrícola localizada no município limítrofe de Seropédica que representa área afastada do centro urbano. A Figura 07 mostra as estações meteorológicas Ecologia Agrícola (A), de Marambaia (B), Vila Militar (C) e Forte de Copacabana (D), todas pertencentes ao INMET.

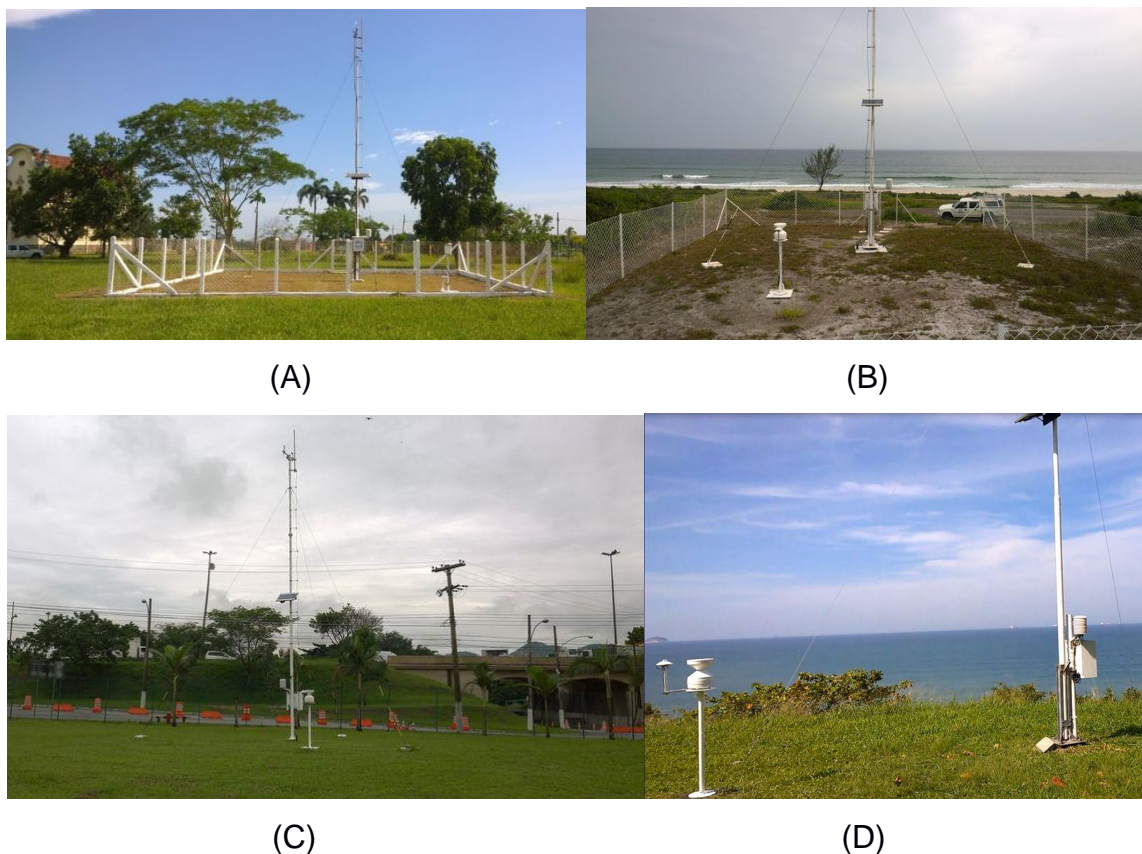


Figura 07 – Estações meteorológicas da RMRJ.

Tabela 01 - Estações meteorológicas

<b>Estação</b>	<b>Fonte</b>	<b>Localização</b>	<b>Altitude</b>
<b>Marambaia (A602)</b>	INMET	23°03'S 43°36'W	9m
<b>Ecológica Agrícola (A601)</b>	INMET	22°48'S 43°41'W	35m
<b>Vila Militar (A621)</b>	INMET	22°51'S 43°24'W	30m
<b>Forte de Copacabana (A652)</b>	INMET	22°59'S 43°11'W	26m
<b>Aeroporto de Santa Cruz (SBSC)</b>	REDEMET	22°55'S 43°43'W	3m
<b>Aeroporto dos Afonsos (SBAF)</b>	REDEMET	22°52'S 43°23'W	34m
<b>São Cristóvão (32)</b>	ALERTA RIO	22°54'S 43°13'W	25m

Como pode ser visto na figura 08, 4 estações estão posicionadas na área urbana: Aeroporto dos Afonsos, Vila Militar, São Cristóvão e Forte de Copacabana; 3 estão localizadas em área não urbana: Marambaia, Base Aérea de Santa Cruz e Ecológica Agrícola. As estações mais próximas da linha da costa são Copacabana, Marambaia

e Base Aérea de Santa Cruz, São Cristóvão está próxima da Baía de Guanabara e representa uma área urbana do centro do Rio de Janeiro, enquanto as que estão posicionadas mais dentro do continente são Ecológica Agrícola, Aeroporto dos Afonsos e Vila Militar.

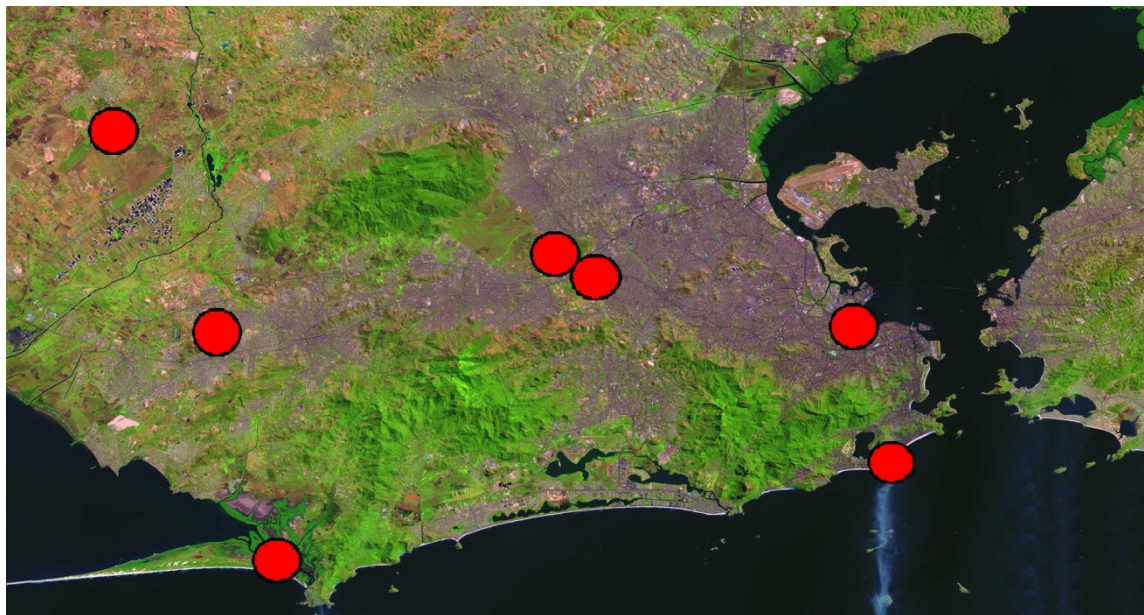


Figura 08 – Localização geográfica das estações.

As estações do Aeroporto dos Afonsos e da Vila Militar são bem próximas uma da outra, no entorno predominando residências de pequeno porte com pouco espaçamento entre as mesmas. Estas estações são localizadas entre os maciços do Gericinó-Mendanha, da Pedra Branca e da Tijuca. Os maciços da Pedra Branca e Tijuca atuam como barreira física na circulação da brisa marítima proveniente do Oceano Atlântico, dificultando a ação dos ventos na RMRJ.

A estação Ecológica Agrícola localiza-se numa área com características rurais, cuja ocupação do solo é do tipo colheita e pastagem. Esta estação fica posicionada mais para dentro do continente. As estações de Marambaia e Forte de Copacabana são as mais próximas no mar e recebem maior influência da brisa marítima do oceano Atlântico.

### **2.3. Distribuições de Frequência e Cumulativa**

Os métodos e técnicas estatísticas são utilizados na Meteorologia basicamente para analisar o tempo passado com o objetivo de entender sobre o provável

comportamento futuro de alguma variável. Ter um número grande de dados registrados de forma contínua não é o suficiente, os dados meteorológicos devem ser medidos em pequenos intervalos de tempo. Geralmente, os dados horários são mais úteis do que dados diários, semanais ou mensais.

Uma distribuição de frequência é elaborada de maneira a extrair com facilidade informações de um conjunto de dados muito extenso. A distribuição de frequências pode ser representada através de um histograma, que é um gráfico cujas bases são os limites das classes e as alturas são as frequências. A representação gráfica é uma maneira simples e direta de analisar e interpretar dados climáticos. A figura 09 mostra um exemplo de distribuição de frequência.

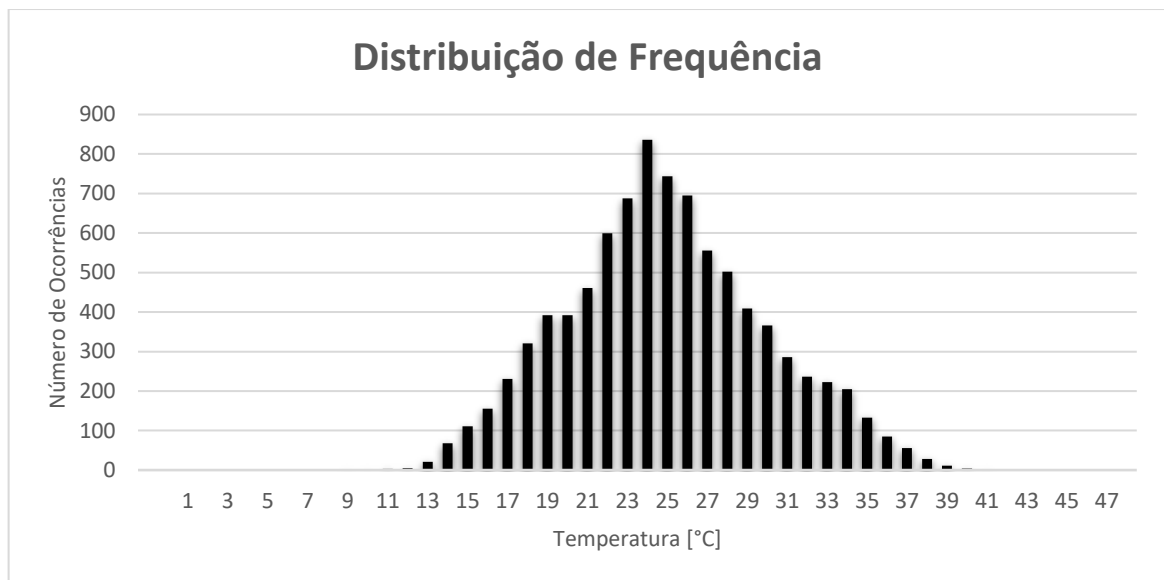


Figura 09 – Distribuição de frequência.

O cálculo de probabilidades para variáveis aleatórias contínuas envolve integração sobre funções contínuas denominadas função densidade de probabilidade (FDP), que representam as distribuições de frequência. Existem duas funções associadas a cada variável aleatória contínua  $X$ : a função densidade de probabilidade, simbolizada por  $f(X)$ , e a função de distribuição cumulativa representada por  $F(X)$ . A função  $f(X)$  é aquela cuja integral de  $X = a$  até  $X = b$  ( $b \geq a$ ) dá a probabilidade de que  $X$  assumira valores compreendidos no intervalo  $(a, b)$ , como indicado na figura 10, ou seja:

$$P(a \leq X \leq b) = \int_a^b f(X) dX \quad (1)$$

A função cumulativa de probabilidade  $F(b)$  é tal que:

$$F(b) = P(X \leq b) = \int_{-\infty}^b f(X) dX \quad (2)$$

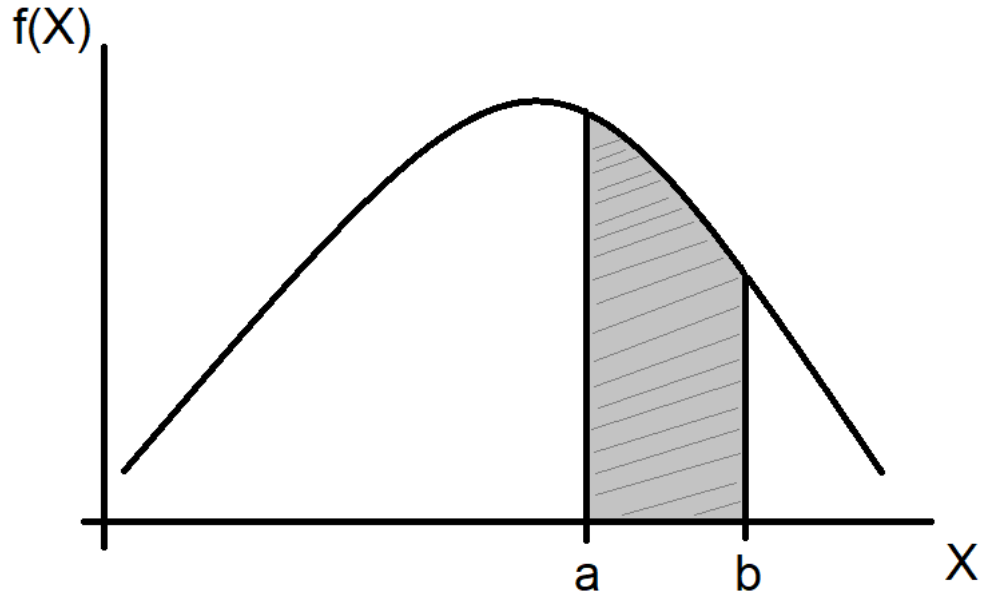


Figura 10 – Função densidade de probabilidade

A figura 11 mostra a função de distribuição cumulativa (FDC) destacando como exemplo o valor de 0,98, que significa que 98% das ocorrências das FDP encontram-se abaixo do valor  $b$  e que apenas 2% das ocorrências superam esse valor.

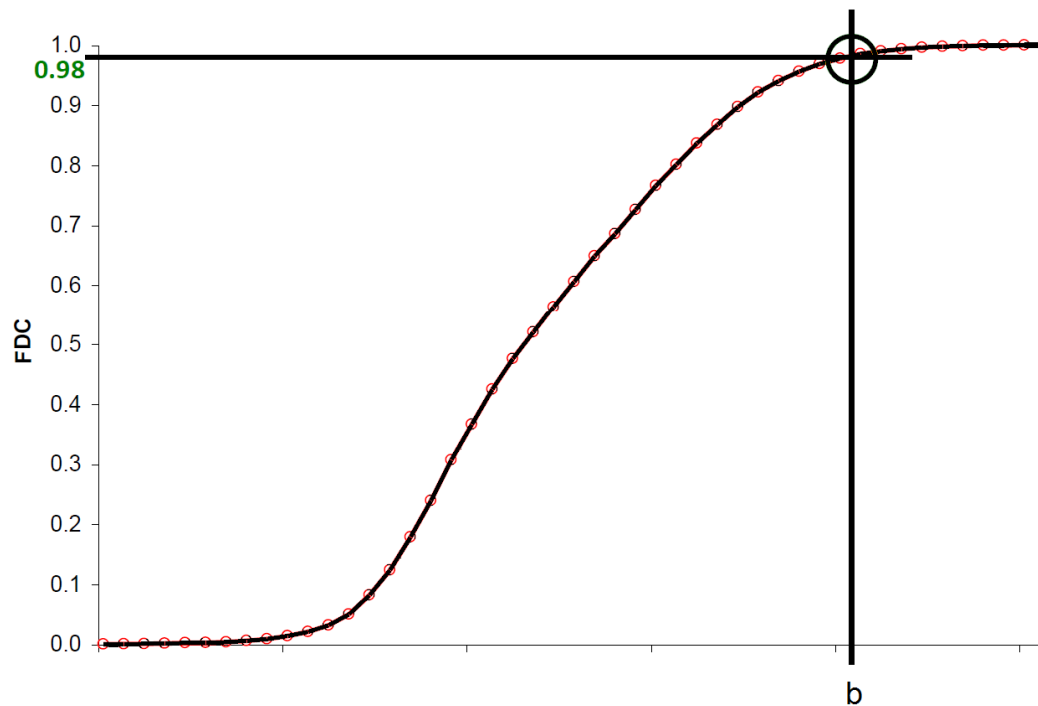


Figura 11 – função de distribuição cumulativa

Os dois extremos da FDC são os mais importantes, uma vez que as temperaturas de projeto podem ser determinadas observando essas duas regiões. As distribuições cumulativas localizadas a esquerda da figura 11 fornecem as condições de temperaturas de projeto de aquecimento usadas para o inverno e as temperaturas a direita as condições de projeto de refrigeração usadas para o verão.

#### **2.4. Dados Meteorológicos para Projetos de AVAC**

O primeiro passo no dimensionamento dos sistemas de ar condicionado é o cálculo da carga térmica para aquecimento e refrigeração do prédio que depende das suas características e tanto das condições internas a serem mantidas na edificação quanto das condições climáticas do ar externo. Para um sistema de AVAC fornecer as condições desejadas de conforto interno e combater a carga térmica nas condições de pico, o projeto deve utilizar dados climáticos extremos registrados para aquela localidade onde o prédio está ou será construído. Esta abordagem, no entanto, resultará em equipamentos de grande porte, o que por sua vez, aumentará os custos inicial do equipamento e operacional.

Os dados meteorológicos necessários para o projeto de sistemas de AVAC incluem valores de temperaturas de bulbo seco, de bulbo úmido e do ponto de orvalho, radiação solar global, além de velocidade e direção do vento, em várias frequências de ocorrência. Eles permitem que as condições de projeto estejam relacionadas com a capacidade do sistema em combater a carga térmica em um sentido probabilístico, garantindo assim uma eficiência energética mais próxima da ideal (ASHRAE, 2013).

Os dados meteorológicos para os projetos de climatização representam as diferentes condições psicrométricas, o que permite ao projetista avaliar várias condições operacionais de pico energético. O projetista deve decidir quais conjuntos de condições e de probabilidades de ocorrência são os mais adequados à situação de projeto que está sob consideração (ASHRAE, 2013).

A temperatura de bulbo úmido (TBU), temperatura de ponto de orvalho (TPO), umidade relativa (UR) e umidade absoluta ( $w$ ) são quatro variáveis comuns que expressam a quantidade de vapor d'água no ar. Elas são usadas em conjunto com a temperatura de bulbo seco (TBS) para representar as condições do estado termodinâmico do ar úmido externo. Geralmente, o par TBS e TBU é o mais utilizado para definir as condições externas de projeto.

A TBS medida em uma estação meteorológica é o valor da temperatura do ar medida de forma direta por um termômetro. Além do registro da temperatura, também ocorre a medição e o registro de outros parâmetros como a umidade, pressão, ponto de orvalho, etc. Ao longo do tempo, depois de construído e processado o banco de dados meteorológicos é selecionado um valor da TBS que será utilizado no projeto. Associado a uma mesma TBS existe um conjunto de dados diferentes que foram registrados e coincidem no tempo com este mesmo valor de TBS.

Na prática é tomada a média desses valores coincidentes para encontrar a temperatura de bulbo úmido coincidente (TBUc) correspondente a uma determinada TBS. O mesmo é feito para uma TBU em que se deseja encontrar a correspondente TBSc. Valores TBSc e TBUc são necessários para uma avaliação realista das condições psicrométricas do ar exterior.

Finalmente quantidades psicrométricas, como a TBU ou entalpia não estão contidas nos conjuntos de dados meteorológicos. Elas são calculadas a partir da TBS, TPO, e pressão barométrica usando as equações psicrométricas.

## **2.5. Cálculo das Condições de Projeto Segundo a ASHRAE (2013)**

As condições de projeto são obtidas através da distribuição de frequências dos dados meteorológicos que são feitas por agrupamento de dados em classes ou vetores de frequência, de tal forma que são contabilizados os números de ocorrências em cada classe. O número de ocorrências de uma determinada classe recebe o nome de frequência. O objetivo é apresentar os dados de uma maneira mais concisa e que permita extrair informação sobre seu comportamento. A distribuição de frequência acumulada é o total acumulado ou soma de todas as classes anteriores até a classe atual.

Os valores das TBS, TPO e TBU correspondentes às diferentes condições de projeto estão ligados às distribuições cumulativas que representam os valores de frequência que excedem certas percentagens. Condições de temperatura para os períodos quentes e úmidos são baseadas nas distribuições cumulativas em que apenas 0,4%, 1,0%, 2,0% das ocorrências estão acima desses valores. As condições de temperatura para os períodos frios são baseadas em percentuais anuais de 99,6% e 99,0%, o que significa que apenas 0,4% e 1,0% das ocorrências estão abaixo desses valores de temperatura estipulados.

Os valores 0,4%, 1,0%, 2,0% correspondem, em média, a 35 horas, 88 horas e 175 horas por ano, respectivamente, para o período de registro. Os valores de projeto podem ocorrer com mais frequência em alguns anos e menos em outros. O uso de percentuais anuais para definir as condições de projeto assegura que eles representam a mesma probabilidade de ocorrência em qualquer clima, independentemente da distribuição sazonal de temperatura e umidade extremas.

Condições anuais de projeto de resfriamento e desumidificação são representadas pela TBS correspondente a 0,4%, 1,0% e 2,0% das frequências acumuladas anuais de ocorrência, utilizando a TBUc para cada frequência. A amplitude térmica diária para o mês mais quente é definida como a média das diferenças entre a máxima diária e a mínima diária das TBS. Estes dados são frequentemente utilizados em projetos de refrigeração e condicionamento do ar.

A TBU correspondente a 0,4%, 1,0% e 2,0% das frequências acumuladas anuais de ocorrência junto com as respectivas TBSc representam extremos da soma dos calores sensível e latente do ar exterior. Essas informações são úteis para o dimensionamento e projetos de torres de resfriamento e resfriamento evaporativo.

O valor coincidente à velocidade média do vento e a sua direção correspondente a 0,4% da temperatura de projeto de bulbo seco é usado para estimar cargas de pico que representam a infiltração.

Condições anuais de projeto de aquecimento e umidificação são representadas pelas TBS correspondentes a 99,6% e 99,0% das frequências acumuladas anuais de ocorrência, utilizando a TBUc para cada frequência. Dados de projeto de vento fornecem informações para estimar cargas de pico representando infiltração: velocidades de vento extremas para o mês mais frio, com a temperatura média de bulbo seco coincidente; e velocidade média e direção do vento coincidente com o valor correspondente a 99,6% da TBS.

Condições de projeto com base em TPO estão diretamente relacionadas com extremos de umidade absoluta, que representam o pico de carga de umidade do ar. As condições de ponto de orvalho extremas podem ocorrer em dias com TBS moderado, resultando em alta UR. Estes valores são especialmente úteis para aplicações de controle de umidade e desumidificação.

O dia típico de projeto de AVAC representa um dia do ano com as condições mais críticas de operação do sistema e tem por finalidade a seleção dos equipamentos que irão manter o conforto térmico da edificação durante qualquer época do ano, para

o dimensionamento mais adequado da carga térmica necessária para suprir todas as necessidades energéticas de pico do edifício ao longo do ano onde condições adversas de temperatura possam aparecer. Dependendo da localização do edifício são definidas as condições externas que vão influenciar todo o sistema de AVAC e que estão atreladas às características climáticas e de radiação solar do lugar.

Geralmente, o clima para cálculos de carga térmica é especificado para verão (projetos de refrigeração) e inverno (projetos de aquecimento). As condições do dia típico de projeto são feitas para fornecer condições de projeto que representam a mesma probabilidade de ocorrência em qualquer lugar, independentemente da distribuição sazonal de temperaturas e umidade extremas. O valor de temperatura de referência é retirado das distribuições cumulativas de temperatura das estações meteorológicas.

As pesquisas da ASHRAE (2013) mostraram um perfil que representa a TBS e TBU para a construção das 24 horas do dia típico de projeto através de um perfil teórico de temperaturas que permite avaliar com precisão admissível a variação da carga térmica horária. Para gerar as temperaturas do dia típico de projeto a tabela 02 fornece as frações das temperaturas horárias que devem ser multiplicadas pelas médias das amplitudes diárias do mês mais quente e depois subtraídas da temperatura correspondente a frequência escolhida. Este procedimento é aplicável a dados anuais ou mensais e é obtido pela equação (3):

$$TBS(h) = TBS - f_h \Delta T_{md} , \quad (3)$$

onde:

$TBS$  é a temperatura de bulbo seco correspondente a frequência escolhida, em °C;

$\Delta T_{md}$  é a média da amplitude diária de temperatura do mês mais quente;

$F_h$  é o fator horário da variação diária de temperatura, conforme tabela 03.

Tabela 02 – Fator horário da variação diária de temperatura (fonte: ASHRAE, 2013)

<b>Fator horário da variação diária de temperatura</b>					
<b>Tempo [h]</b>	<b>Fator</b>	<b>Tempo [h]</b>	<b>Fator</b>	<b>Tempo [h]</b>	<b>Fator</b>
<b>1</b>	0,88	<b>9</b>	0,55	<b>17</b>	0,14
<b>2</b>	0,92	<b>10</b>	0,38	<b>18</b>	0,24

<b>3</b>	0,95	<b>11</b>	0,23	<b>19</b>	0,39
<b>4</b>	0,98	<b>12</b>	0,13	<b>20</b>	0,50
<b>5</b>	1,00	<b>13</b>	0,05	<b>21</b>	0,59
<b>6</b>	0,98	<b>14</b>	0,00	<b>22</b>	0,68
<b>7</b>	0,91	<b>15</b>	0,00	<b>23</b>	0,75
<b>8</b>	0,74	<b>16</b>	0,06	<b>24</b>	0,82

## **2.6. Preenchimento de Dados Ausentes e Representatividade dos Dados Meteorológicos Segundo a ASHRAE (2013)**

Os conjuntos de dados meteorológicos podem conter lacunas e registros isolados. Lacunas de até 6 horas são preenchidas por interpolação linear, a fim de fornecer séries temporais mais completas. TBS, TPO, pressão barométrica, e UR são interpolados, no entanto, a velocidade e a direção do vento não podem ser interpoladas. A TPO é calculada a partir de valores interpolados de TBS e umidade absoluta.

Algumas estações meteorológicas fornecem conjuntos de dados onde não são registrados valores na hora exata. Quando em falta, estes podem ser substituídos por dados de até 30 minutos antes ou depois.

O conjunto de dados meteorológicos deve ser completo o suficiente para que as condições climáticas de projeto sejam estatisticamente significativas. Alguns meses podem ser eliminados durante as verificações de controle de qualidade, por terem intervalos incompletos muito grandes. As distribuições de frequências acumuladas anualmente são construídas a partir das distribuições de frequências relativas compiladas para cada mês, os dados de cada mês individualmente são incluídos se preencherem os critérios de seleção para a integralidade e distribuição imparcial dos dados seguindo recomendações de pesquisa da ASHRAE 890-RP (Colliver Et al., 1998), onde os meses inteiros são aceitos na análise, ou rejeitados, com base nos seguintes critérios:

- O número de valores de TBS de hora em hora para o mês, após o preenchimento por interpolação, deve ser no mínimo, 85% do total de horas do mês.
- A diferença entre os números de valores disponíveis das TBS entre dias e noites de cada mês deve ser inferior a 60.

- Após a correção dos dados meteorológicos das estações deve haver um número mínimo de 8 meses válidos de cada um dos 12 meses do ano, ou seja, deve haver no mínimo 8 meses de janeiro, fevereiro, março, abril, maio, junho, julho, agosto, setembro, outubro, novembro e dezembro válidos. O que corresponde a 8 anos completos.

Estes critérios foram retirados do estudo realizado no projeto de pesquisa ASHRAE RP-1171 (Hubbard et al., 2004), que mostrou que um mínimo de oito anos de dados proporcionaria cálculos confiáveis de projetos climáticos para a maioria das estações, com uma variação de  $\pm 1^{\circ}\text{C}$ , comparando com os valores relativos a um período de 30 anos.

A TPO, TBU, e entalpia são calculadas para um determinado mês apenas se o número de dados válidos for superior a 85% do número mínimo de valores de TBS definidos anteriormente. As condições de velocidade e direção dos ventos são calculadas para um dado mês apenas se o número de valores for maior do que 28,3%, que corresponde a um terço de 85%, o número mínimo de valores de TBS.

## **2.7. Projeto de Sistema de AVAC Através do *Hourly Analysis Program***

No projeto de um sistema de AVAC, faz-se necessária uma simulação computacional para encontrar a carga térmica máxima coincidente. O programa *Hourly Analysis Program* (HAP) desenvolvido pela Carrier é uma das ferramentas de projeto que realiza estas simulações.

Esta seção foi elaborada a partir do manual do HAP versão 4.9.1, Carrier (2016), o qual está fundamentado em procedimentos padrões e algoritmos estabelecidos pela ASHRAE (2013).

O programa oferece inúmeras opções de simulação, podendo realizar análises em escalas anuais, mensais e horárias para todos os dias ao longo de um ano. Os resultados destas simulações servem para comparar a viabilidade e possibilidades de variação do sistema de AVAC de modo que o melhor projeto ou conceito seja escolhido para implementação.

O HAP possui ferramentas para elaboração do cálculo de carga térmica para refrigeração e aquecimento para espaços e zonas térmicas, determina taxas de fluxo de ar e as vazões do sistema, dimensiona ventiladores e serpentinas das centrais de

tratamento de ar. Além dos recursos para a seleção de equipamentos, o programa também simula o consumo de energia e o custo energético do edifício.

O sistema de condicionamento de ar deve ser capaz de atender às cargas térmicas internas e externas simuladas para os dias de projeto de inverno e verão para serem feitos os dimensionamentos dos componentes de cada sistema. Um sistema é formado não só pelo equipamento condicionador de ar, mas também pelas zonas térmicas atendidas por ele. Assim, são calculadas as capacidades das serpentinas de resfriamento, aquecimento, vazões de insuflação, vazões de ar externo e vazões nos terminais de insuflação para cada ambiente. Uma vez especificados os componentes, o programa executa automaticamente a simulação para o ano todo, caso tenha os dados de cada mês ou para o dia típico de projeto simulando a carga térmica de pico.

Os métodos apresentados nessa seção e a forma de cálculo são descritos pela ASHRAE (2013), utilizados pelo HAP 4.9.1 (2016) e reproduzidos de Carmo (2017). A carga térmica para um sistema de ar condicionado é definida pela quantidade de calor que deve ser retirada do ambiente a ser resfriado, indicada por,  $\dot{Q}_f$ . Este parâmetro pode ser determinado como o somatório das quantidades de calor presentes em um ambiente e é descrito como:

$$\dot{Q}_f = \dot{Q}_{envoltória} + \dot{Q}_{pessoas} + \dot{Q}_{iluminação} + \dot{Q}_{equipamento} + \dot{Q}_{arexterno} + \dot{Q}_{infiltração}, \quad (4)$$

onde:

$\dot{Q}_f$  é o calor total interno do ambiente que é obtido através da soma de todas as parcelas que compõem o cálculo da quantidade de calor do ambiente. O primeiro termo é o calor da construção representado por  $\dot{Q}_{envoltória}$ . Além disso, a utilização do prédio é afetada pela componente dos ocupantes da edificação,  $\dot{Q}_{pessoas}$ . O calor proveniente da iluminação está associado a  $\dot{Q}_{iluminação}$ . Junto com as pessoas e iluminação também tem mais um componente interno associado a dissipação de calor pelos equipamentos do local, representado por  $\dot{Q}_{equipamento}$ . As componentes que estão associados ao ar externo são representadas por  $\dot{Q}_{arexterno}$  e  $\dot{Q}_{infiltração}$  que corresponde ao ar de infiltração nos ambientes.

O HAP utiliza o conceito de tempo solar aparente (TSA), que está relacionado com o movimento do sol através do céu. A partir dele pode-se calcular o fluxo solar e o ganho de calor solar para o edifício em relação ao ambiente externo.

A posição zênite do sol é quando ele atinge o ponto mais alto do céu. Este é considerado o meio-dia de acordo com o TSA e não obrigatoriamente a hora do relógio se correlaciona com a posição do sol. O resto do dia é determinado a partir do ponto de meio-dia solar (ASHRAE, 2013).

O TSA é calculado a partir das equações (5) até (7):

$$TSA = HL + \frac{ET}{60} + \frac{L_{local} - L_{meridiano}}{15}, \quad (5)$$

$$ET = 2,2918[0,0075 + 0,1868\cos(B) - 3,20077\sin(B) - 1,4615\cos(2B) - 4,089(2B)], \quad (6)$$

$$B = \frac{[360 \times (N_{dia} - 1)]}{365}, \quad (7)$$

onde:

TSA: Tempo solar aparente;

HL: Hora local;

$L_{meridiano}$ : Longitude do meridiano de referência do fuso horário em graus;

$L_{local}$  = Longitude para o local em estudo em graus.

ET = Fator da diferença entre hora local e TSA devido aos efeitos orbitais da Terra, horas;

$N_{dia}$  = Dia do ano.

A radiação solar é descrita tendo um componente direto e outro difuso, os quais estão indicados nas equações (8) e (9):

$$E_{dir} = E_o \exp[-\tau_{dir} \times m^{adir}], \quad (8)$$

$$E_{dif} = E_o \exp[-\tau_{dif} \times m^{adif}], \quad (9)$$

onde:

$E_{dir}$  é a radiação direta;

$E_{dif}$  é a radiação difusa;

$E_o$  é a radiação solar extraterrestre;

$\tau_{dir}$  e  $\tau_{dif}$  são as profundidades ópticas das radiações direta e difusa respectivamente;

$m^{adir}$  e  $m^{adif}$  são os expoentes de massa de ar das radiações direta e difusa, respectivamente:

$$E_o = E_{sc} \left\{ 1 + 0,033 \cos \left[ 360^\circ \times \frac{n-3}{365} \right] \right\}, \quad (10)$$

$$adir = 1,454 - 0,406\tau_{dir} - 0,268\tau_{dif} + 0,021\tau_{dir}\tau_{dif}, \quad (11)$$

$$adif = 0,507 - 0,205\tau_{dir} - 0,080\tau_{dif} + 0,190\tau_{dir}\tau_{dif}. \quad (12)$$

Para superfícies verticais, a radiação difusa na horizontal,  $E_{rad,dif,hor}$ , é uma relação entre  $Y$  de radiação difusa do céu claro, onde  $Y$  é uma função do ângulo de incidência  $\theta$ :

$$E_{rad,dif,hor} = E_{dif} \times Y, \quad (13)$$

onde:

$$Y = \max(0,45; 0,55 + 0,437 \times \cos\theta + 0,313 \times \cos^2\theta). \quad (14)$$

Para superfícies não horizontais a radiação é definida por:

$$E_{rad,dif,n\grave{a}ohor} = E_{dif} \times (Y \sin\Sigma + \cos\Sigma), \text{ para } \Sigma \leq 90^\circ, \quad (15)$$

$$E_{rad,dif,n\grave{a}ohor} = E_{dif} \times Y \sin\Sigma, \text{ para } \Sigma > 90^\circ, \quad (16)$$

onde:

$\Sigma$  é ângulo de inclinação para a superfície do edifício, em graus.

A radiação refletida ( $E_{rad,ref}$ ) para todas as orientações é definida por:

$$E_{rad,ref} = (E_{dir} \times \sin\beta + E_{dif}) \times pg \times \frac{1-\cos\Sigma}{2}, \quad (17)$$

onde:

$pg$  é grau de refletividade do solo;

$\beta$  é ângulo de altitude solar.

Todos os termos que pertencem ao somatório da carga térmica podem ser definidos como sendo as quantidades de calor presentes em um ambiente. O HAP avalia separadamente cada fator que compõe esta equação.

Para a carga da envoltória, o HAP calcula as transferências de calor das janelas, portas, paredes, pisos e telhados que estão ligados a carga da envoltória que é representada através da equação (18):

$$\dot{Q} = U \times A \times \Delta T, \quad (18)$$

onde:

$\dot{Q}$  é a quantidade de calor transferido na superfície, [W];

$U$  é o coeficiente global de transferência de calor, [W/(m<sup>2</sup>.°C)];

$\Delta T$  é a variação de temperatura presente durante a iteração, [°C].

Os elementos que têm contato com o meio externo, como as paredes e coberturas, sofrem uma correção de temperatura do ar externo através do HAP. Essa temperatura corrigida é denominada temperatura do ar solar ( $T_{as}$ ), (ASHRAE, 2013):

$$T_{as} = TBS_{ae} + \alpha \times \frac{I_T}{h_e} - \varepsilon \times \frac{U}{h_e}, \quad (19)$$

onde:

$TBS_{ae}$  é a temperatura de bulbo seco do ar exterior, [°C];

$\alpha$  é fator de absorção à radiação solar da superfície;

$I_T$  é a intensidade total do fluxo solar, [W/m<sup>2</sup>];

$h_e$  é o coeficiente de transferência de calor por convecção externo, o valor de referência é de 17 [W/m<sup>2</sup>.K];

$U$  é o coeficiente global de transferência de calor, em [W/(m<sup>2</sup>.°C)];

$\Delta T$  é a diferença entre radiação de onda longa incidente na superfície exterior e radiação de corpo negro na temperatura  $TBS_{ae}$ , em  $[W/m^2]$ . O valor de referência é 0 para superfícies verticais e 20 para superfícies horizontais.

As janelas também possuem um ganho de calor devido a radiação solar, calculado pela equação (20):

$$\dot{Q}_j = \dot{Q}_{jan,dir} + \dot{Q}_{jan,dif} \quad , \quad (20)$$

onde:

$\dot{Q}_{jan}$  é a ganho total de calor pela janela,  $[W]$ ;

$\dot{Q}_{jan,dir}$  é a ganho total de calor por radiação direta na janela,  $[W]$ ;

$\dot{Q}_{jan,dif}$  é a ganho total de calor por radiação difusa na janela,  $[W]$ .

Sendo que estes componentes são descritos como:

$$\dot{Q}_{jan,dir} = A \times E_{rad,dir} \times SHGC_{dir} \times IAC_{dir} \quad , \quad (21)$$

$$\dot{Q}_{jan,dif} = A \times (E_{rad,dir} + E_{rad,dif}) \times SHGC_{dif} \times IAC_{dif} \quad , \quad (22)$$

onde:

$A$  é a área da janela,  $[m^2]$ ;

$SHGC$  é o coeficiente de ganho de calor solar direto ou difuso da janela;

$IAC$  é o coeficiente de atenuação solar interior direto ou difuso da janela.

A carga térmica das pessoas ( $\dot{Q}_{pessoas}$ ) que ocupam a edificação é calculada pelo programa como indicado a seguir pela equação (23):

$$\dot{Q}_{pessoas} = HG \times N_{pessoas} \times F_o/100 \quad , \quad (23)$$

onde:

$HG$  é o ganho de calor sensível e latente por pessoa, em W/pessoa;

$N_{pessoas}$  é a ocupação;

$F_o$  é a programação de ocupação da edificação, em percentual.

A infiltração e do ar externo possuem parcelas latentes ( $\dot{Q}_{L,ae}$ ) e sensíveis ( $\dot{Q}_{s,ae}$ ), calculados por:

$$\dot{Q}_{s,ae} = \rho_{ae} \times c_{p,ae} \times \dot{V}_{ae} \times (T_{ae} - T_{ac}) \quad , \quad (24)$$

$$\dot{Q}_{L,ae} = \rho_{ae} \times h_{va} \times \dot{V}_{ae} \times (\omega_{ae} - \omega_{ac}) \quad , \quad (25)$$

onde:

$\rho_{ae}$  é a massa específica do ar, [kg/m<sup>3</sup>];

$\dot{V}_{ae}$  é a vazão volumétrica de ar, [m<sup>3</sup>/s];

$h_{va}$  é a entalpia de vaporização da água presente no ar, [kJ/kg];

$c_{p,ae}$  é o calor específico do ar, [kJ/kg.°C];

$T_{ae}$  é a temperatura do ar externo, [°C];

$\omega_{ae}$  é a umidade absoluta do ar externo, [k g<sub>água</sub>/k g<sub>ar</sub>];

$T_{ac}$  é a temperatura do ambiente condicionado, [°C];

$\omega_{ac}$  é a umidade absoluta do ambiente condicionado, [k g<sub>água</sub>/k g<sub>ar</sub>].

O HAP permite a entrada de três opções de dados para o cálculo da vazão de ar a ser insuflada nos ambientes ( $\dot{V}_{ins}$ ). O programa possibilita a entrada dos dados para o cálculo a partir da temperatura de insuflação, da vazão mínima de ar a ser insuflada e da vazão mínima de ar por metro quadrado a ser insuflada.

A vazão de ar,  $\dot{V}_{ins}$ , necessária para combater a carga térmica do sistema é definida pela equação (26):

$$\dot{V}_{ins} = \left[ \frac{\dot{Q}_{cargat\acute{e}rmica}}{\rho_{ar} \times (h_{ambiente} - h_{insufla\c{c}ao})} \right] \quad , \quad (26)$$

onde:

$\dot{V}_{ins}$  é a vazão de ar para o combate de carga térmica, [m<sup>3</sup>/s];

$\dot{Q}_{cargat\acute{e}rmica}$  é calor total interno do ambiente, [kW];

$\rho_{ar}$  é a massa específica do ar na temperatura de insuflação, [kg/m<sup>3</sup>];

$h_{ambiente}$  é a entalpia específica do ambiente resfriado, [kJ/kg];

$h_{insufla\c{c}ao}$  é a entalpia do ar condicionado insuflado, [kJ/kg].

Se o dado de entrada for vazão mínima de ar ( $\dot{V}_{min,ins}$ ) a ser insuflado no ambiente, o HAP, faz a seguinte análise:

$$\dot{V}_{ins,perd} = \dot{V}_{min,ins} \times \left(1 - \frac{F_{perda}}{100}\right), \quad (27)$$

$$\dot{V}_{ins} = \left[ \frac{Q_{cargat\acute{e}rmicadoambiente}}{Q_{cargat\acute{e}rmicadosistema}} \right] \times \dot{V}_{ins,perd}, \quad (28)$$

onde:

$\dot{V}_{ins,perd}$  é a vazão ar necessária para vencer as perdas de calor nos dutos;

$F_{perda}$  fator de perdas de calor dos dutos, em percentual.

Quando o dado de entrada é a vazão mínima de ar por metro quadrado,  $\dot{V}_{min,insarea}$ , a ser insuflado no ambiente, o HAP, utiliza as equações anteriores relacionada com a equação (29).

$$\dot{V}_{min,ins} = \dot{V}_{min,insarea} \times A_{ambiente}, \quad (29)$$

O HAP possui quatro tipos de sistemas de resfriamento que podem ser combinados ou utilizados individualmente, dependendo do projeto a ser implementado. Os sistemas são divididos em: unidades de pré-resfriamento, centrais de resfriamento, unidade de resfriamento em sistemas terminais de indução e unidade de resfriamento em sistemas terminais, como “fan coils”. Para todos eles o dimensionamento da serpentina é obtido através do somatório das equações (30) e (31) que indicam o calor sensível e o calor latente:

$$\dot{Q}_{s,serp} = \rho_{ar}/\rho_{ref,ar} \times c_{p,ar} \times \dot{V}_{ins} \times (T_{e,serp} - T_{s,serp}), \quad (30)$$

$$\dot{Q}_{L,serp} = \rho_{ar} / \rho_{ref,ar} \times h_{va} \times \dot{V}_{ins} \times (\omega_{e,serp} - \omega_{s,serp}) . \quad (31)$$

A umidade absoluta,  $\omega$ , na saída da serpentina é definida de acordo com o fator de “by-pass” (BF) da serpentina pela seguinte equação (32):

$$\omega_{s,serp} = BF \times (\omega_{e,serp} - \omega_{ADP}) + \omega_{ADP} . \quad (32)$$

Sendo que  $\omega_{ADP}$  é a umidade absoluta na TPO. O BF pode ser definido como sendo:

$$BF = \frac{T_{s,serp} - TPO}{T_{e,serp} - TPO} . \quad (33)$$

O ganho de calor do ar de insuflação ao passar pelo motor do ventilador ( $\dot{Q}_{motor}$ ) também é computado na estimativa de carga térmica. Para tal, é utilizada a seguinte metodologia da equação (34):

$$\dot{Q}_{motor} = (1 - \eta_{motor}) \times Potência . \quad (34)$$

Sendo que a potência elétrica ( $\dot{W}_{motor}$ ) é estimada por:

$$\dot{W}_{motor} = \frac{\dot{V}_{ins} \times \Delta P}{36700 \times \eta} , \quad (35)$$

onde:

$\Delta P$  é pressão estática total do ventilador em Pascal;

$\eta$  é a eficiência do ventilador.

A vazão de água destinada ( $\dot{V}_{\acute{a}gua}$ ) aos dispositivos é determinada pela equação (36):

$$\dot{V}_{\text{água}} = \frac{\dot{Q}_{\text{picodecargat\u00e9rmica}}}{\rho_{\text{água}} \times c_{p,\text{água}} \times \Delta T_{\text{água}}}, \quad (36)$$

onde:

$\rho_{\text{água}}$  é a massa específica da água, [kg/m<sup>3</sup>];

$c_{p,\text{água}}$  é o calor específico da água, [kJ/kg.°C];

$\Delta T_{\text{água}}$  é a variação de temperatura da água, [°C].

## 2.8. Ventilação e Renovação de Ar

Para a determinação da taxa de ar externo para renovação são utilizados dois parâmetros: um que relaciona a necessidade de renovação com a área do ambiente condicionado e outro com o número de pessoas que ocupa o mesmo, sempre se considerando a finalidade do recinto condicionado. Os dois componentes somados resultam na taxa de ar externo para o ambiente em questão, e que adicionado às taxas de ar externo dos demais ambientes, resultam na taxa total de renovação de ar que deverá ser fornecida pelo sistema de ar-condicionado central. A renovação de ar ou vazão de ar exterior é necessária para a manutenção da qualidade do ar interior.

A vazão mínima de ar exterior necessária para o ambiente possuir as mínimas condições de qualidade do ar interior é calculada pelas normas NBR 16401 (ABNT, 2008) e pela Resolução n° 09 (ANVISA, 2003).

A NBR 16401 utiliza a seguinte metodologia de cálculo:

$$\dot{V}_{\text{arexterno}} = (A_{\text{ambiente}} \times F_{\text{area}} + N_{\text{pessoas}} \times F_{\text{pessoas}}) \times 3,6, \quad (37)$$

onde:

$\dot{V}_{\text{arexterno}}$ : vazão de ar externo em [m<sup>3</sup>/h];

$A_{\text{ambiente}}$ : área do ambiente em [m<sup>2</sup>];

$F_{\text{area}}$ : fator de área definido pela norma, em [L/s.m<sup>2</sup>];

$N_{\text{pessoas}}$ : número de pessoas no ambiente.

$F_{\text{pessoas}}$ : fator por pessoas definido pela norma, em [L/s.pessoas].

Entretanto a ANVISA determina a vazão de ar externo por:

$$\dot{V}_{arexterno} = N_{Pessoas} \times F_{Pessoas} , \quad (38)$$

onde:

$\dot{V}_{arexterno}$ : vazão de ar externo em [m<sup>3</sup>/h];

$N_{Pessoas}$ : número de pessoas no ambiente;

$F_{Pessoas}$ : fator por pessoas definido pela resolução, em [m<sup>3</sup>/h.pessoas].

O fator  $F_{Pessoas}$  está relacionado a quantidades de pessoas em cada ambiente ou zona. Locais com alta densidade de pessoas deve ser utilizado o fator de 17 m<sup>3</sup>/h.pessoas, enquanto que ambientes com baixa densidade o fator utilizado é de 27 m<sup>3</sup>/h.pessoas.

O número de renovações mínimo tem por finalidade garantir condições mínimas de qualidade do ar no ambiente, ou seja, assegurar concentrações mínimas de substâncias que possam causar danos à saúde dos usuários. Esta vazão será definida por:

$$\dot{V}_{n^{\circ}detrocas\acute{m}inimo} = N_{trocas} \times Vol , \quad (39)$$

onde:

$\dot{V}_{n^{\circ}detrocas\acute{m}inimo}$  é a vazão de ar mínima decorrente do número de trocas estipulado, em metros cúbicos por segundo;

$N_{trocas}$  é o número de trocas mínimo por hora para o referido ambiente;

$Vol$  é o volume do ambiente em metros cúbicos.

### 3. METODOLOGIA

#### 3.1. Cálculo das Temperaturas de Projeto

Os dados de cada estação meteorológica foram processados utilizando os métodos da ASHRAE (2013) descritos no item 2.6. A tabela 03 mostra as faixas de anos analisadas e as respectivas quantidades de anos aproveitados para a formação das distribuições de frequência.

Tabela 03 – Dados meteorológicos utilizados

<b>Locais</b>	<b>Período</b>	<b>Anos Aproveitados</b>
<b>São Cristóvão</b>	2002 a 2015	13 anos
<b>Aeroporto dos Afonsos</b>	2003 a 2013	8 anos
<b>Aeroporto de Santa Cruz</b>	2003 a 2013	8 anos
<b>Ecológica Agrícola</b>	2000 a 2016	13 anos
<b>Marambaia</b>	2002 a 2016	10 anos
<b>Vila Militar</b>	2007 a 2016	8 anos
<b>Forte de Copacabana</b>	2007 a 2016	9 anos

Para a construção das distribuições de frequência foi utilizado o programa Microsoft Excel, seguindo os passos abaixo:

Passo 1 – preenchimento de lacunas segundo critérios apresentados na seção 2.6;

Passo 2 – para cada mês, verificação quanto ao seu aproveitamento segundo critérios também apresentados na seção 2.6;

Passo 3 – verificação se o menor número de repetições de um mesmo mês aproveitáveis é igual ou superior a 8, caso contrário a estação meteorológica em tela será excluída da análise;

Passo 4 – descarte dos meses repetidos mais antigos, de forma que o número de repetições de um mesmo mês seja igual para todos os 12 meses do ano;

Passo 5 – geração de dados de TBU a partir dos dados de TBS e TPO ou UR disponíveis usando equações da psicrometria;

Passo 6 – ordenamento dos dados em ordem crescente de TBS;

Passo 7 – extração dos valores de TBS correspondentes aos 5 níveis de frequência recomendados;

Passo 8 - cálculo da TBUc tomando a média entre todos os valores de TBU coincidentes no tempo com cada valor de TBS correspondente aos 5 níveis de frequência recomendados;

Passo 9 – repetição dos passos 6 e 7 para TBU somente para os 3 níveis de frequência recomendados para resfriamento;

Passo 10 – cálculo da TBSc tomando a média entre todos os valores de TBS coincidentes no tempo com cada valor de TBU correspondente aos 3 níveis de frequência recomendados;

Passo 11 – para arquivos com UR, geração de dados de TPO a partir dos dados de TBS e UR disponíveis usando equações da psicrometria;

Passo 12 – repetição dos passos 6 e 7 para TPO;

Passo 13 – cálculo da TBSc tomando a média entre todos os valores de TBS coincidentes no tempo com cada valor de TPO correspondente aos 5 níveis de frequência recomendados;

Passo 14 – cálculo de  $w$  a partir de TPO e TBSc usando equações da psicrometria.

### **3.2. Cálculo da Carga Térmica**

As cargas térmicas de resfriamento e de aquecimento foram calculadas para os 9 (nove) pontos escolhidos da cidade do Rio de Janeiro utilizando os valores de temperatura de projeto obtidos para cada localidade estudada através dos 5 níveis da distribuição cumulativa: 0,4%, 1,0%, 2,0%, 99,6% e 99,0%.

Todos os parâmetros relacionados ao sistema de AVAC foram mantidos constantes e foram alteradas apenas as localizações geográficas dos pontos estudados, junto com os seus respectivos valores de temperaturas, e assim, representar uma edificação construída em cada um desses pontos. As velocidades e direções dos ventos não foram diretamente analisadas para os diversos pontos, apenas suas influências indiretas nas temperatura e umidade do ar.

O cálculo de carga térmica foi realizado através do HAP versão 4.9.1. Nesta seção são apresentadas informações referentes aos dados que foram inseridos no HAP.

A concepção arquitetônica da construção é baseada em um prédio comercial com salas administrativas, salas de aula, atendimento ao público e áreas de informática, utilizando janelas de vidro simples, portas de madeira, paredes de tijolo cerâmico vazado com revestimento de argamassa em ambos os lados, laje de concreto e cobertura com telhado. Todos os ambientes internos são rebaixados com forro de gesso. A Figura 12 mostra a planta baixa da construção com a distribuição dos ambientes.

Cada ambiente da Figura 12 foi associado a uma zona térmica. Assim, cada zona térmica ficou delimitada pelas quatro paredes, o teto e o piso.

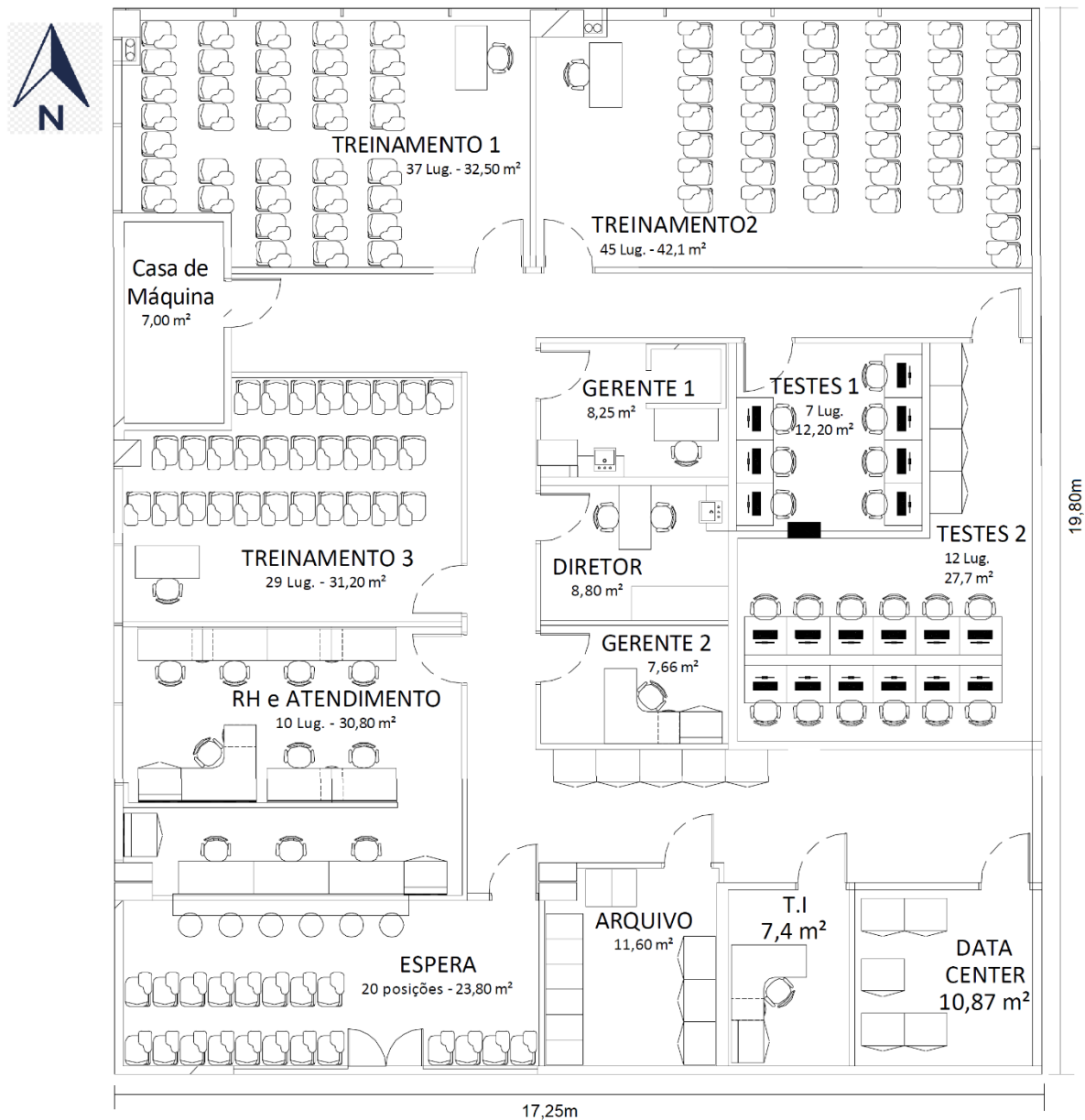


Figura 12 – Planta baixa

Na tabela 04 temos as áreas de cada ambiente com os seus respectivos números de ocupantes. O pé direito útil de todos os ambientes é de 3 metros.

O HAP permite definir composições diferentes para paredes internas e externas. Além disso, outros tipos construtivos podem ser definidos e aplicados, como: portas, vidraças e divisórias.

Os dados de envoltória são necessários para o cálculo do coeficiente global de transferência de calor, U. As propriedades termofísicas dos materiais que compõem a envoltória foram obtidas da norma NBR 15220 (ABNT, 2005) e são apresentadas detalhadamente em tabelas no apêndice A.

A envoltória é formada por paredes internas, paredes externas, janelas, portas internas e externas e telhado. A partir dos materiais que são produzidos cada um destes componentes pode-se determinar o ganho ou perda de calor através da envoltória da construção.

Tabela 04 – Zonas térmicas

<b>Zonas</b>	<b>Ambientes</b>	<b>Área [m<sup>2</sup>]</b>	<b>Pessoas</b>
1	Treinamento 1	32,50	38
2	Treinamento 2	42,10	45
3	Casa de Máquina	7,00	-
4	Treinamento 3	31,20	30
5	Gerente 1	8,25	2
6	Testes 1	12,20	7
7	Diretor	8,80	2
8	Gerente 2	7,66	1
9	Testes 2	27,70	12
10	RH e Atendimento	30,80	10
11	Espera	23,80	20
12	Arquivo	11,60	-
13	T.I.	7,40	1
14	Data Center	10,87	-
15	Corredor	57,40	-

Com as características da envoltória da edificação inseridas no Programa, o perfil e características das cargas internas do prédio devem ser informados. Para a carga interna deve-se conhecer os perfis de ocupação por pessoas e o tipo de atividade no prédio, o uso de equipamentos elétricos, iluminação e períodos de utilização para todas as zonas térmicas. Estes dados são utilizados nos cálculos das cargas internas de geração de calor dos ambientes.

O perfil de ocupação por pessoas foi baseado na utilização de um edifício de escritórios com salas de aula e com funcionamento no horário comercial. A figura 13 mostra a porcentagem de ocupação em cada horário durante os dias úteis. Não há ocupação nos sábados, domingos e feriados.

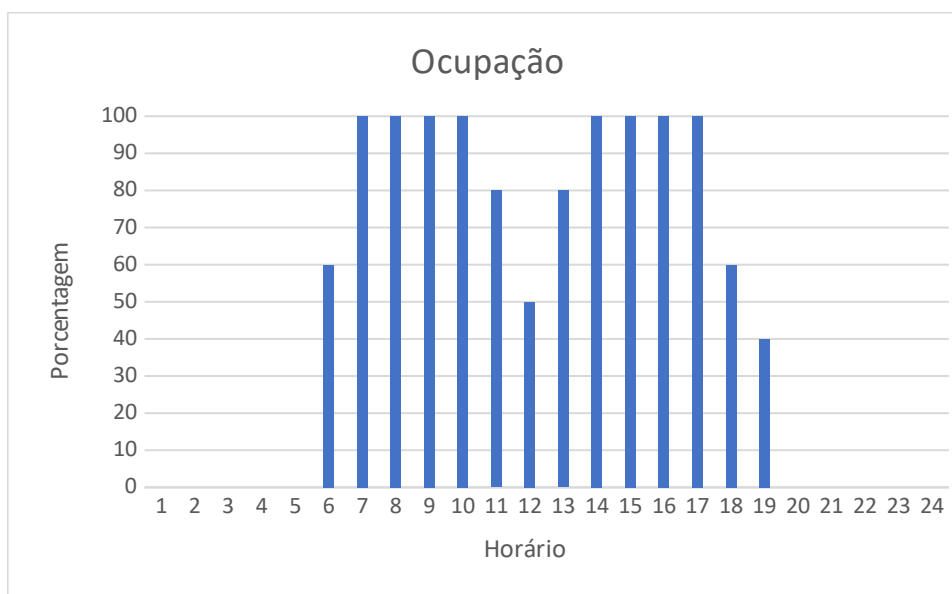


Figura 13 – Perfil de ocupação.

Para a dissipação de calor pelas pessoas foram utilizados os dados de calor sensível e latente descritos na norma NBR 16401 (ABNT, 2008), os quais levam em consideração a atividade fim do ambiente. A tabela 05 mostra o valor adotado da taxa de calor liberado por pessoa.

Tabela 05 – Taxa de calor liberado por pessoas

Taxas típica de calor liberado por pessoas			
Nível de atividade	Local	Calor Sensível [W]	Calor Latente [W]
Sentado, trabalho leve	Escritório	70,0	45,0

Fonte: ABNT (2008).

O perfil de utilização da iluminação é mostrado na figura 14. A iluminação permanece completamente desligada nos sábados, domingos e feriados.

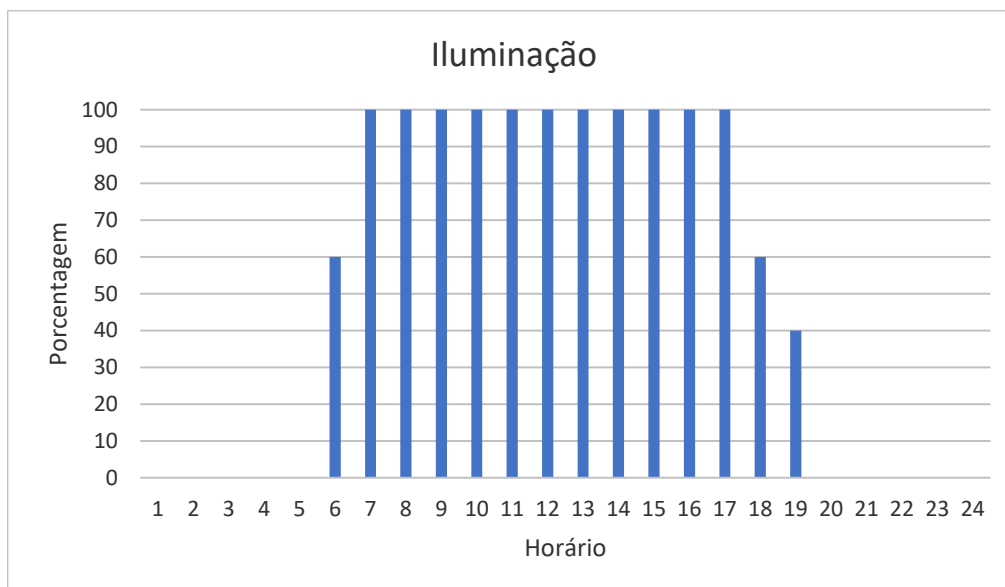


Figura 14 – Perfil da iluminação

A tabela 06 apresenta os dados de iluminação do edifício.

Tabela 06 – Dados de potência de iluminação.

Taxas típica de dissipação de calor pela iluminação		
Local	Tipos de iluminação	Potência dissipada
Escritórios	Fluorescente	16,0W

Fonte: ABNT (2008)

O perfil de utilização dos equipamentos é mostrado na figura 15. Não há equipamentos ligados nos sábados, domingos e feriados.



Figura 15 – Perfil dos equipamentos.

A tabela 07 mostra os valores adotados conforme ABNT (2008) para a dissipação de calor dos equipamentos.

Tabela 07 – Taxa de dissipação de calor dos equipamentos

Taxas típica de dissipação de calor de equipamentos			
Equipamentos	Uso contínuo [W]	Modo, em espera [W]	
Computadores	35,0	25,0	
Impressoras	320,0	70,0	
	Potência máxima [W]	Dissipação recomendada [W]	
Bebedouros	700,0	350,0	
		Sensível [W]	Latente [W]
Máquina de café	1500,0	1050,0	450,0

Fonte: ABNT (2008).

A vazão de ar exterior de renovação é determinada pela comparação entre os valores recomendados pela ANVISA (2003) e ABNT (2008). As vazões calculadas são apresentadas na tabela 08 com os valores adotados sublinhados.

Tabela 08 – Vazão de ar externo

Zonas	Ambientes	ANVISA	ABNT
1	Treinamento 1	180,6	<u>314,3</u>
2	Treinamento 2	212,5	<u>375,4</u>
3	Casa de Máquina	0,0	<u>3,5</u>
4	Treinamento 3	141,7	<u>253,1</u>
5	Gerente 1	<u>15,3</u>	11,7
6	Testes 1	52,8	<u>63,5</u>
7	Direto	<u>15,3</u>	12,0
8	Gerente 2	<u>8,3</u>	7,6
9	Testes 2	90,3	<u>114,9</u>
10	RH e Atendimento	<u>75,0</u>	53,4
11	Espera	<u>94,4</u>	87,9
12	Arquivo	0,0	<u>5,8</u>
13	T.I.	<u>8,3</u>	7,5
14	Data Center	0,0	<u>5,4</u>
15	Corredor	0,0	<u>28,7</u>

Para todos os ambientes, o *setpoint* de temperatura do sistema de condicionamento de ar foi fixado em 24°C e a UR em até 65%, atendendo a recomendações da ABNT (2008) para fins de conforto.

Foi necessária a concepção de um sistema de climatização adequado ao edifício em estudo. Foi considerada a operação de uma central de água gelada equipada com unidades resfriadoras (*chillers*) com condensação a ar e um sistema de ventilação utilizando volume de ar variável (VAV). O sistema VAV reduz os volumes de ar insuflado para o mínimo necessário ao ambiente nos momentos em que o sistema não está na carga de pico. Dessa forma ocorre uma redução do gasto energético.

## 4. RESULTADOS

### 4.1. Temperaturas de Projeto

As tabelas 09 a 14 apresentam, respectivamente para as estações Ecológica Agrícola, Marambaia, Forte de Copacabana, Aeroporto dos Afonsos, Aeroporto de Santa Cruz e São Cristóvão, os valores em graus Celsius de TBS e TBUc; TPO, TBSc e w (em g H<sub>2</sub>O/kg ar seco); TBU e TBSc, para as frequências de 0,4%, 1,0%, 2,0%, 99,0% e 99,6%, bem como o  $\Delta T_{md}$  do mês mais quente de todo o período analisado. Para o caso da estação da Vila Militar, os dados disponíveis possibilitaram apenas determinar os valores de TBS e TBUc, apresentados na tabela 15.

Tabela 09 – Temperaturas de projeto da estação Ecológica Agrícola (°C)

Ecológica Agrícola	Resfriamento		Desumidificação			Resfriamento evaporativo	
	TBS	TBUc	TPO	TBSc	w	TBU	TBSc
Frequência 0,4%	36,5	24,54	25,1	29,6	20,2	27,4	33,7
Frequência 1,0%	35,3	24,53	24,7	28,5	19,7	26,7	33
Frequência 2,0%	34,1	24,34	24,3	28,2	19,2	26,2	32,1
	Aquecimento		Umidificação				
Frequência 99,6%	13,2	12,9	10,7	20,8	8,0		
Frequência 99,0%	14,3	13,81	11,8	20,4	8,6		
$\Delta T_{md}$	12,5						

Tabela 10 – Temperaturas de projeto da estação Marambaia (°C)

Marambaia	Resfriamento		Desumidificação			Resfriamento evaporativo	
	TBS	TBUc	TPO	TBSc	w	TBU	TBSc
Frequência 0,4%	35,6	23,36	24,6	28,4	19,6	26,1	31,1
Frequência 1,0%	34	23,15	24,1	27,8	19,0	25,7	30,7
Frequência 2,0%	32,3	23,09	23,7	27,2	18,5	25,2	29,9
	Aquecimento		Umidificação				
Frequência 99,6%	13,7	12,47	9,4	18,8	7,3		
Frequência 99,0%	14,8	13,6	10,7	19,4	8,0		
$\Delta T_{md}$	10,2						

Tabela 11 – Temperaturas de projeto da estação Forte de Copacabana (°C)

Forte de Copacabana	Resfriamento		Desumidificação			Resfriamento evaporativo	
	<b>TBS</b>	<b>TBUc</b>	<b>TPO</b>	<b>TBSc</b>	<b>W</b>	<b>TBU</b>	<b>TBSc</b>
Frequência 0,4%	33,1	25,33	24,9	28,5	20,0	29,4	32,4
Frequência 1,0%	31,7	24,58	24,4	27,6	19,4	28,1	31
Frequência 2,0%	30,6	24,1	23,9	26,7	18,8	26,9	29,4
	Aquecimento		Umidificação				
Frequência 99,6%	16,9	14,93	10,6	24,6	7,9		
Frequência 99,0%	17,6	15,54	11,9	21,4	8,7		
$\Delta T_{md}$	7,9						

Tabela 12 – Temperaturas de projeto da estação Aeroporto dos Afonsos (°C)

Aeroporto dos Afonsos	Resfriamento		Desumidificação			Resfriamento evaporativo	
	<b>TBS</b>	<b>TBUc</b>	<b>TPO</b>	<b>TBSc</b>	<b>W</b>	<b>TBU</b>	<b>TBSc</b>
Frequência 0,4%	37	24,34	25	29,3	20,1	27,1	34
Frequência 1,0%	36	24,32	25	29,3	20,1	26,6	35
Frequência 2,0%	35	24,36	24	28,4	18,9	26,2	32,6
	Aquecimento		Umidificação				
Frequência 99,6%	12	11,4	10	19	7,6		
Frequência 99,0%	13	12,36	11	20	8,2		
$\Delta T_{md}$	12,14						

Tabela 13 - Temperaturas de projeto da estação Aeroporto de Santa Cruz (°C)

Aeroporto de Santa Cruz	Resfriamento		Desumidificação			Resfriamento evaporativo	
	<b>TBS</b>	<b>TBUc</b>	<b>TPO</b>	<b>TBSc</b>	<b>W</b>	<b>TBU</b>	<b>TBSc</b>
Frequência 0,4%	36	24,3	25	29,4	20,1	26,8	32,2
Frequência 1,0%	35	24,12	24	27,9	18,9	26,1	31,8
Frequência 2,0%	33	26,96	24	27,9	18,9	25,6	34,9
	Aquecimento		Umidificação				
Frequência 99,6%	13	12,35	10	21,3	7,6		
Frequência 99,0%	14	13,27	11	20,5	8,2		
$\Delta T_{md}$	10,96						

Tabela 14 – Temperaturas de projeto da estação São Cristóvão (°C)

São Cristóvão	Resfriamento		Desumidificação			Resfriamento evaporativo	
	<b>TBS</b>	<b>TBUc</b>	<b>TPO</b>	<b>TBSc</b>	<b>w</b>	<b>TBU</b>	<b>TBSc</b>
Frequência 0,4%	36,8	24,37	24,6	28,6	19,6	27	34,3

Frequência 1,0%	35,6	24,15	24,1	28,5	19,0	26,4	32,8
Frequência 2,0%	34,3	24,36	23,7	28,3	18,5	25,9	32,1
	Aquecimento		Umidificação				
Frequência 99,6%	15,5	13,92	9,9	20	7,6		
Frequência 99,0%	16,8	15,03	11,3	21,5	8,3		
$\Delta T_{md}$	9,06						

Tabela 15 – Temperaturas de projeto da estação Vila Militar (°C)

Vila Militar	Resfriamento		Desumidificação			Resfriamento evaporativo	
	TBS	TBUc	TPO	TBSc	w	TBU	TBSc
Frequência 0,4%	37	22,79	-	-	-	-	-
Frequência 1,0%	35,9	22,78	-	-	-	-	-
Frequência 2,0%	34,8	22,96	-	-	-	-	-
	Aquecimento		Umidificação				
Frequência 99,6%	12,4	11,86	-	-			
Frequência 99,0%	13,5	12,78	-	-			
$\Delta T_{md}$	12,7						

As tabelas 16 e 17, reproduzidas da NBR 16401 (ABNT, 2008) apresentam, respectivamente para estações dos Aeroportos internacional Antônio Carlos Jobim e Santos Dumont, os valores de TBS e TBUc; TPO, TBSc e w; TBU e TBSc, para as frequências de 0,4%, 1,0%, 2,0%, 99,0% e 99,6%, bem como o  $\Delta T_{md}$  do mês mais quente.

Tabela 16 – Temperaturas de projeto da estação Aeroporto Internacional Antônio Carlos Jobim (°C)

Galeão	Resfriamento		Desumidificação			Resfriamento evaporativo	
	TBS	TBUc	TPO	TBSc	w	TBU	TBSc
Frequência 0,4%	38,1	25,6	27,1	30,1	22,9	28,1	32,8
Frequência 1,0%	36,2	25,3	26,2	29,3	21,7	27,5	32
Frequência 2,0%	35,9	24,9	26	29,1	21,4	27	31,3
	Aquecimento		Umidificação				
Frequência 99,6%	14,8	-	9,9	23,2	7,6		
Frequência 99,0%	15,8	-	11,2	22,5	8,3		
$\Delta T_{md}$	9,8						

Fonte: ABNT (2008)

Tabela 17 – Temperaturas de projeto da estação Aeroporto Santos Dumont (°C)

Santos Dumont	Resfriamento		Desumidificação			Resfriamento evaporativo	
	TBS	TBUc	TPO	TBSc	w	TBU	TBSc
Frequência 0,4%	34	25,2	25,3	29,1	20,4	26,6	30,8
Frequência 1,0%	32,7	25	25	28,9	20,1	26,2	30,3
Frequência 2,0%	31,8	24,9	24,6	28,4	19,6	25,8	29,9
	Aquecimento		Umidificação				
Frequência 99,6%	16,1	-	11,8	19,5	8,6		
Frequência 99,0%	17	-	12,9	19,5	9,3		
$\Delta T_{md}$	6,1						

Fonte: ABNT (2008)

As maiores diferenças de TBS ocorreram sempre entre as estações do Aeroporto Internacional Antônio Carlos Jobim e Forte de Copacabana, de 5,0, 4,5 e 5,3 °C respectivamente para os níveis de frequência de 0,4%, 1,0% e 2,0%.

Observou-se um valor de TBUc no nível de frequência de 2% no Aeroporto de Santa Cruz, bastante elevado em relação a todos os outros, fato que precisa ser melhor investigado através do uso de uma série temporal mais extensa.

Retirando da análise o valor extremo mencionado no parágrafo anterior, as maiores diferenças de TBUc ocorreram sempre entre as estações do Aeroporto Internacional Antônio Carlos Jobim e Vila Militar, de 2,8, 2,5 e 1,9 °C respectivamente para os níveis de frequência de 0,4%, 1,0% e 2,0%.

As estações meteorológicas do Forte de Copacabana, aeroporto Santos Dumont, São Cristóvão e aeroporto Antônio Carlos Jobim estão próximas a Baía de Guanabara e quase alinhadas perpendicularmente à linha do litoral. Foi constatado um aumento da TBS que vai do litoral em direção ao continente (direção norte) em todos os níveis de frequência analisados.

#### 4.2. Carga Térmica de Resfriamento

A figura 16 ilustra uma comparação entre todas as estações meteorológicas, das cargas térmicas de resfriamento calculadas para os níveis de frequência de 0,4%, 1,0% e 2,0%. Para todos os níveis de frequência, as cargas térmicas calculadas para o Aeroporto Internacional Antônio Carlos Jobim foram as maiores, seguidas do Aeroporto Santos Dumont, o que mostra que os dados apresentados na norma NBR 16401 (ABNT, 2008) são conservadores. Somente ultrapassados na frequência de

2,0% para o aeroporto de Santa Cruz, decorrente da TBUc elevada já reportada anteriormente, cuja carga térmica calculada ficou 8,9% acima da calculada para o aeroporto Antônio Carlos Jobim.

Os menores valores surgiram para as estações de Marambaia e da Vila Militar, locais que apresentaram menores valores da TBUc.

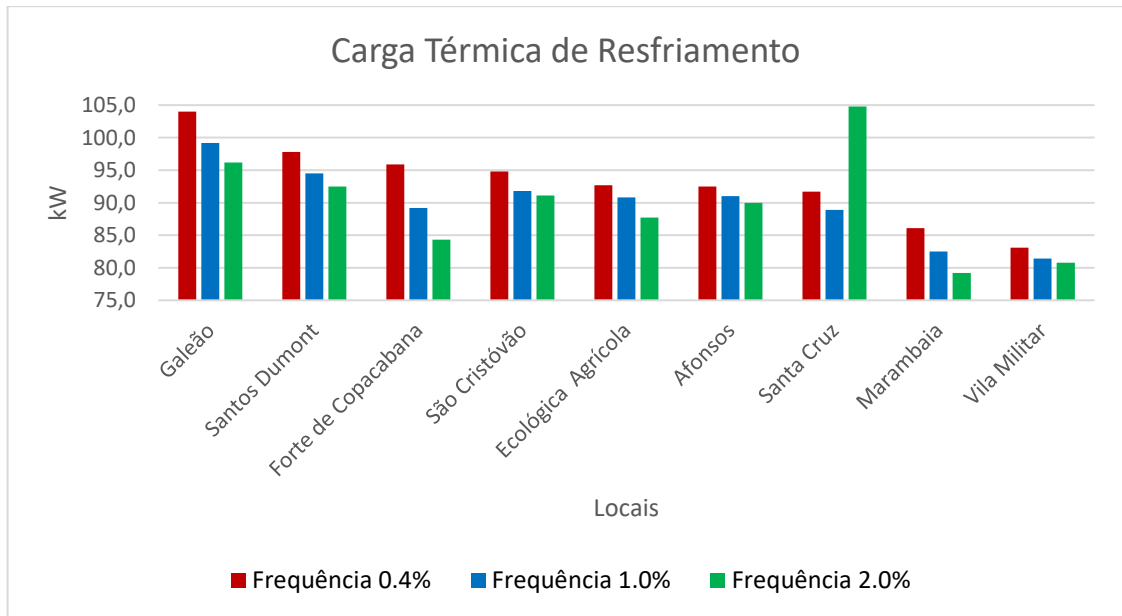


Figura 16 – Cargas térmicas de pico para resfriamento

A figura 17 apresenta as cargas térmicas para a frequência de 0,4% e a figura 18 ilustra a correlação entre a carga térmica e as temperaturas de projeto para a frequência de 0,4%.

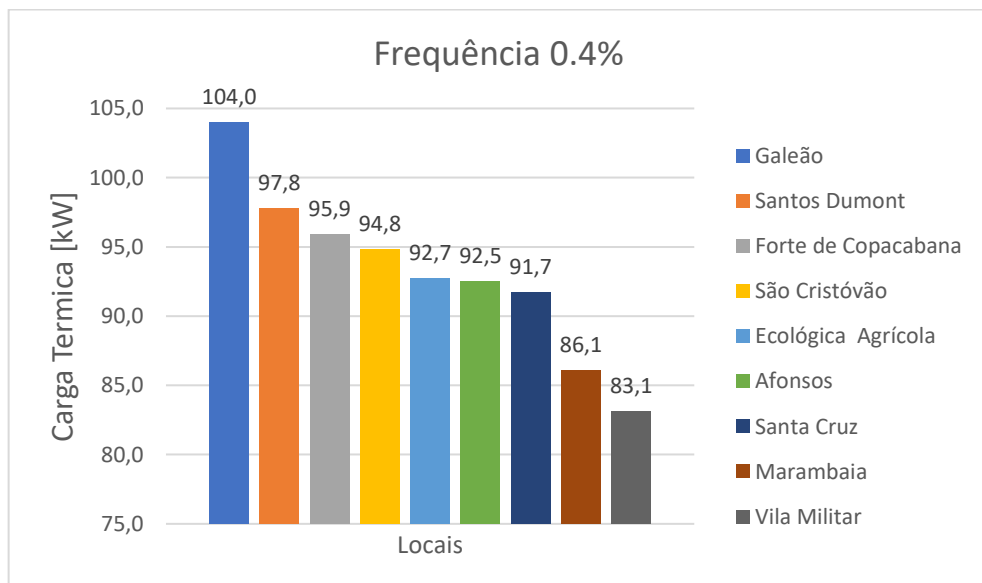


Figura 17 – Cargas térmicas para o nível de frequência 0,4%

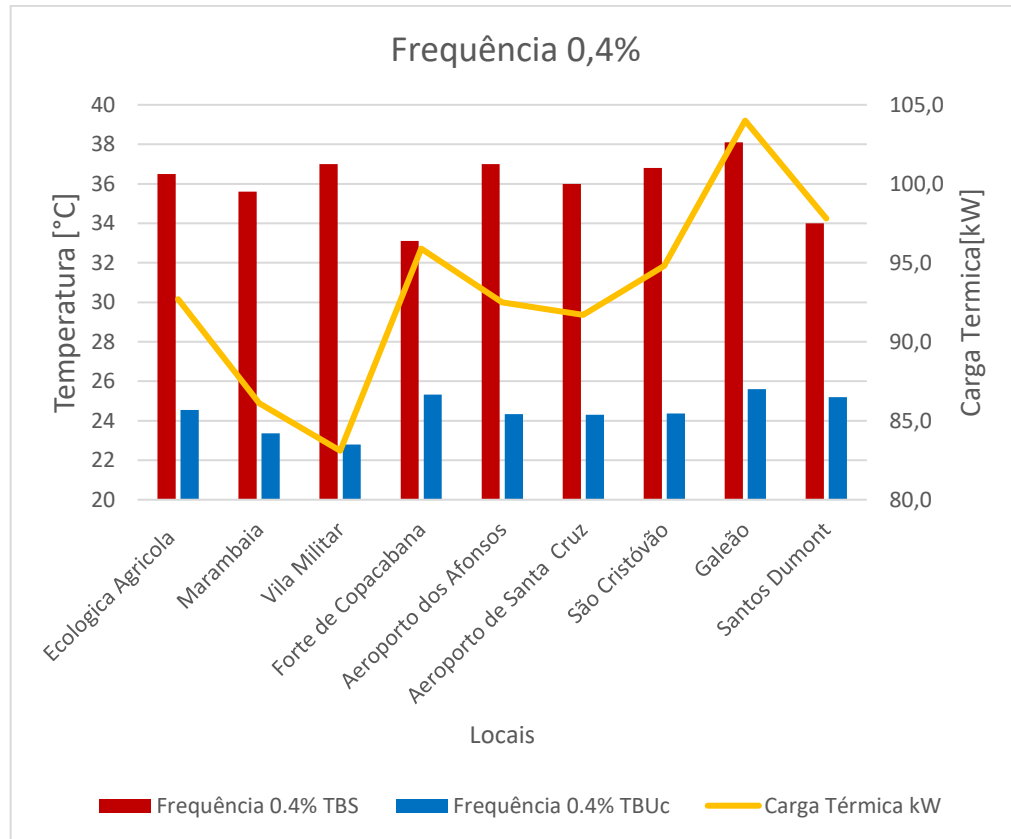


Figura 18 – Temperaturas de Projeto e Carga Térmica ao nível de frequência de 0,4%

A figura 19 apresenta as cargas térmicas para a frequência de 1% e a figura 20 ilustra a correlação entre a carga térmica e as temperaturas de projeto para a frequência de 1%.

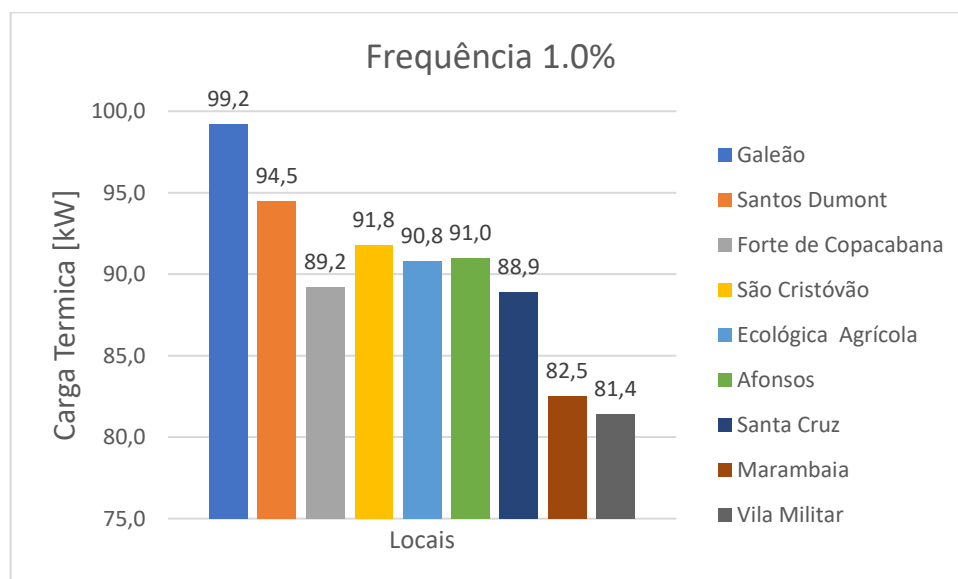


Figura 19 – Cargas térmicas para frequência 1,0%

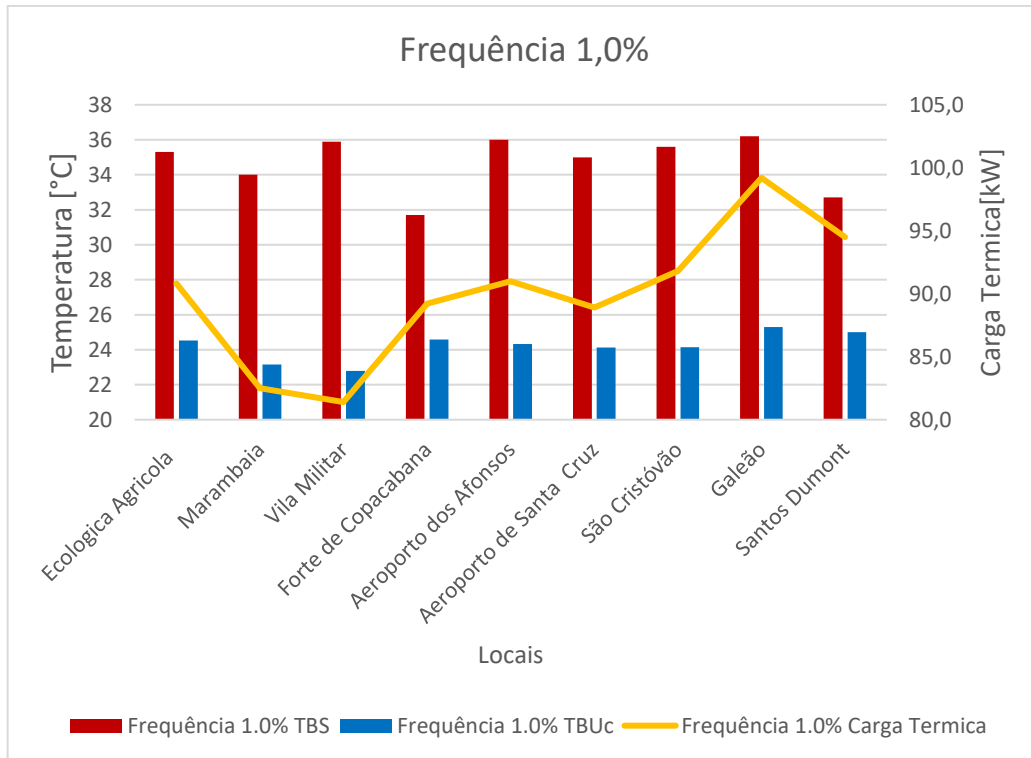


Figura 20 – Temperaturas de Projeto e Carga Térmica ao nível de frequência de 1,0%

A figura 21 apresenta as cargas térmicas para a frequência de 2% e a figura 22 ilustra a correlação entre a carga térmica e as temperaturas de projeto para a frequência de 2%.

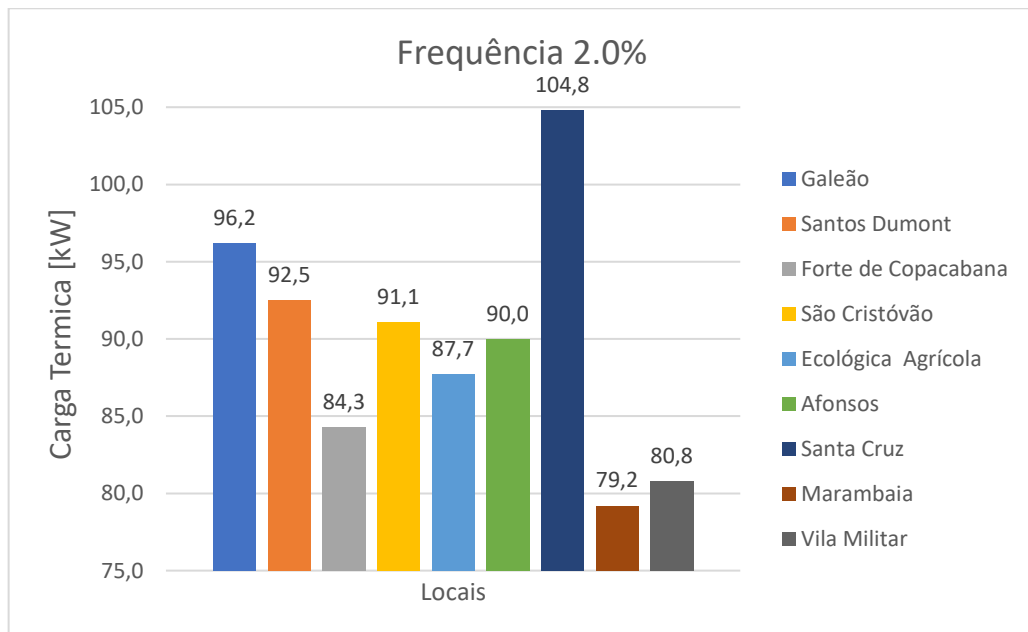


Figura 21 – Cargas térmicas para frequência 2,0%

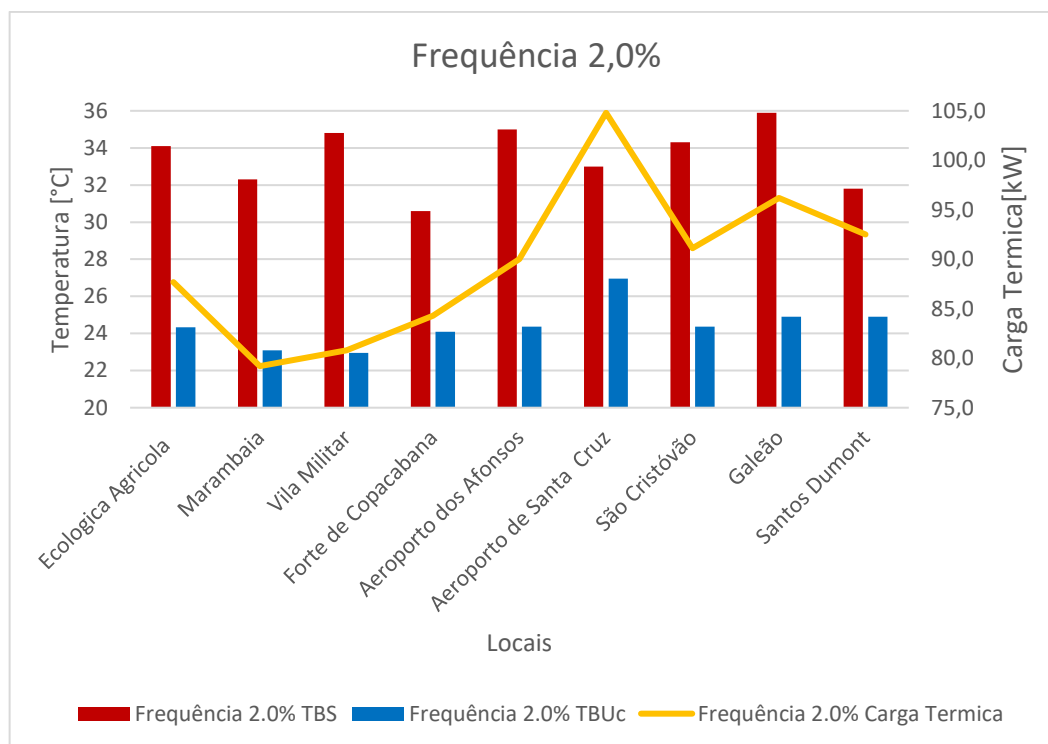


Figura 22 – Temperaturas de Projeto e Carga Térmica ao nível de frequência de 2,0%

As cargas térmicas obtidas para a Vila Militar ficaram 20,1% e 15% inferiores, respectivamente, às dos aeroportos Antônio Carlos Jobim e Santos Dumont para a frequência de 0,4%. Esta tendência se repetiu para os demais níveis de frequência.

Além da TBS, também devemos analisar a TBU, pois exerce grande influência no controle da umidade e no cálculo da carga térmica. As estações meteorológicas da Vila Militar e do aeroporto dos Afonsos são bem próximas entre si. A diferença na TBS é zero para a frequência de 0,4% e chega a um pouco menos do que 0,6% para a frequência de 2,0%. Já a TBU varia de 6,0% até 6,8%. A carga térmica de resfriamento variou de 11,3% até 11,7% entre estas 2 estações.

A estação Ecológica Agrícola está localizada em uma área considerada como rural. Ela apresentou valores de cargas térmicas maiores que algumas áreas consideradas urbanas do município do Rio de Janeiro. Isto provavelmente se deve a um microclima mais seco nestas localidades.

Para o nível de frequência de 0,4%, a carga térmica para o Forte de Copacabana apresentou o terceiro maior valor, mesmo tendo o menor valor de TBS, em comparação com as outras estações meteorológicas. Por outro lado, o Forte de Copacabana apresenta a segunda maior TBUc, o que confirma uma forte influência da TBUc no valor da carga térmica para resfriamento.

### 4.3. Carga Térmica de Aquecimento

A figura 23 mostra uma comparação entre todas as estações meteorológicas, das cargas térmicas de aquecimento calculadas para os níveis de frequência de 99,6% e 99,0%. As cargas térmicas de aquecimento apresentaram valores absolutos muito menores, quando comparados às cargas térmicas de resfriamento. O maior valor encontrado correspondeu a 15,2% do valor da carga térmica de resfriamento correspondente.

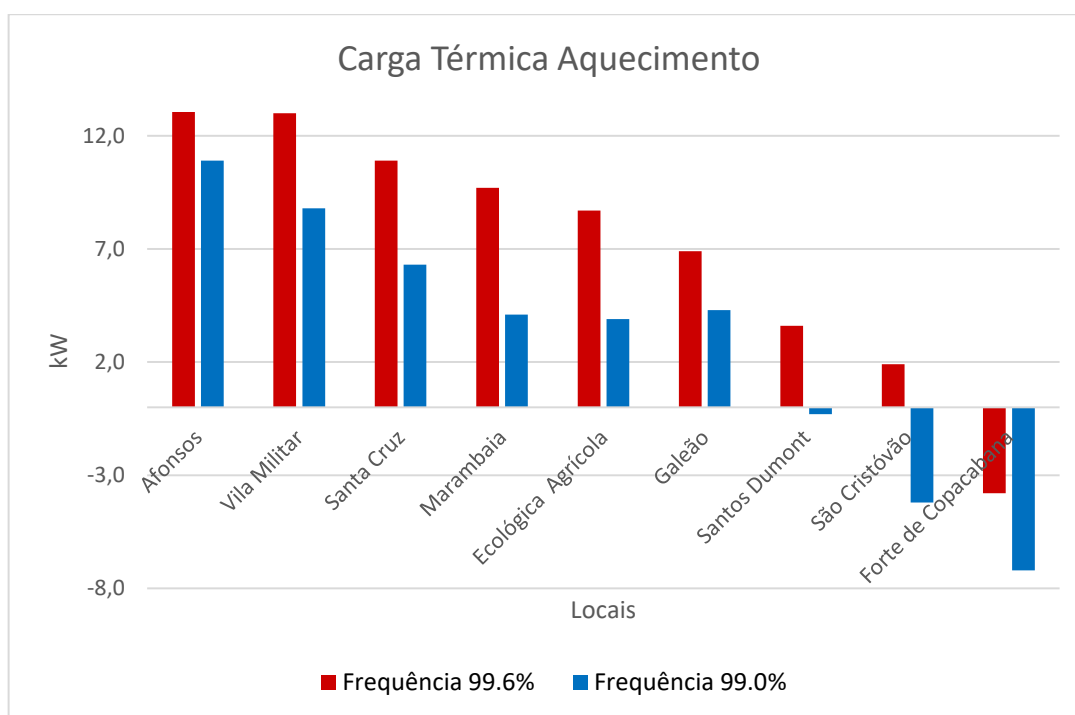


Figura 23 – Cargas térmicas de pico para aquecimento

As cargas térmicas de aquecimento para os 2 níveis de frequência apresentaram valores negativos para o Forte de Copacabana e somente para o nível de 99,0% para São Cristóvão e Aeroporto Santos Dumont. Isto significa que para essas localidades o sistema de aquecimento não será necessário, pois só há necessidade de combater a carga térmica para resfriamento do ambiente.

Analisando as TBS e TBUc para os níveis de frequência de 99,6% e 99,0% observamos uma certa proporcionalidade entre os dois valores que se repete para todos os locais e se reflete também nos valores da carga térmica de aquecimento.

A figura 24 apresenta as cargas térmicas para a frequência de 99,6% e a figura 25 ilustra a correlação entre a carga térmica e as temperaturas de projeto para a frequência de 99,6%.

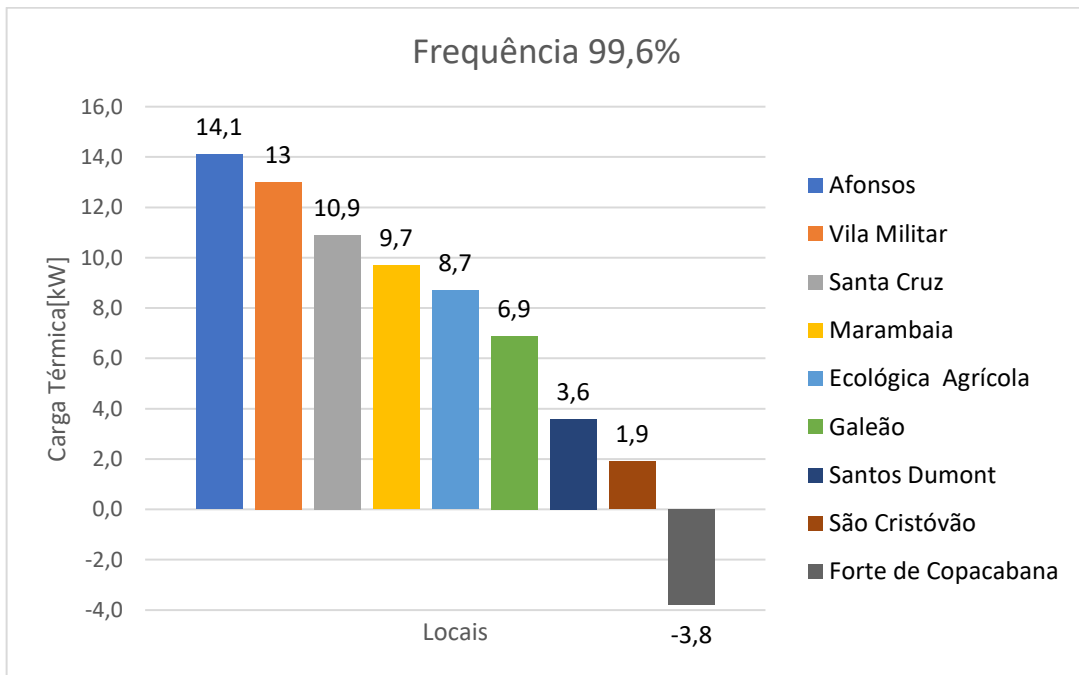


Figura 24 – Cargas térmicas para frequência 99,6%

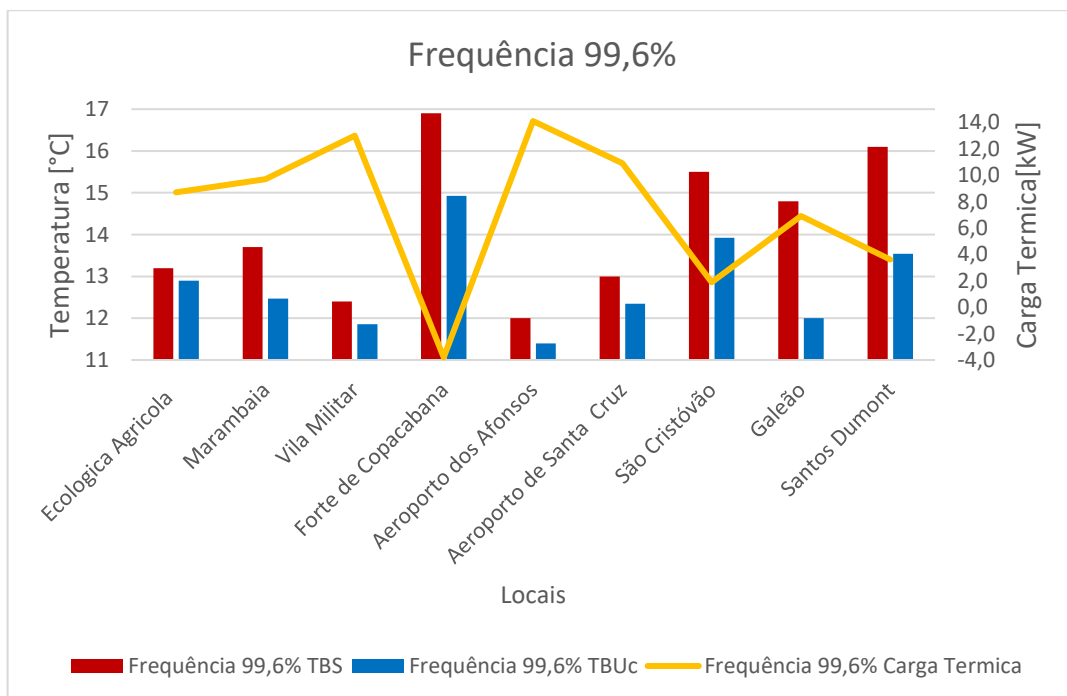


Figura 25 – Temperatura e Carga térmica de 99,6%

A figura 26 apresenta as cargas térmicas para a frequência de 99,0% e a figura 27 ilustra a correlação entre a carga térmica e as temperaturas de projeto para a frequência de 99,0%.

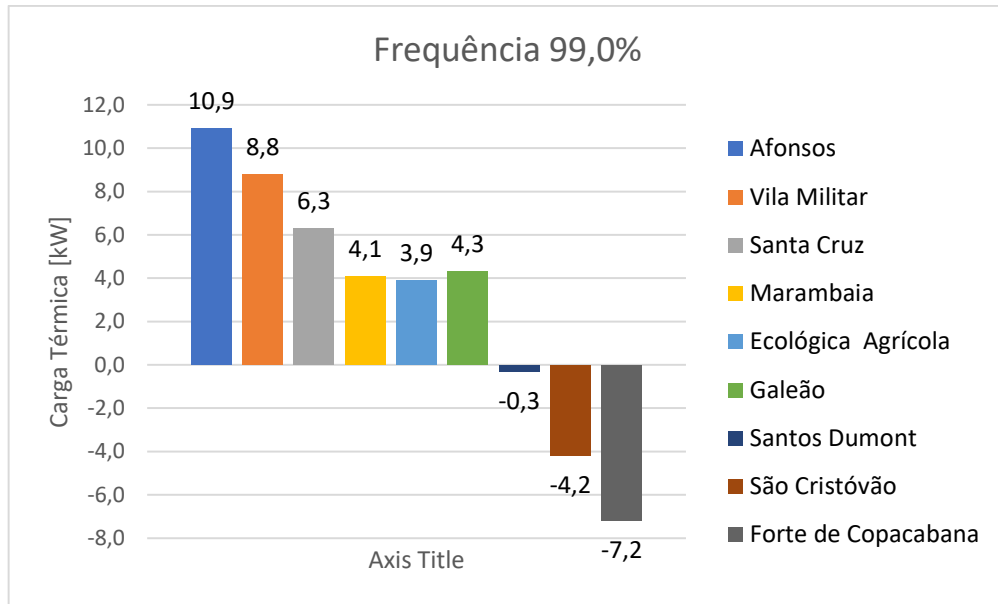


Figura 26 – Cargas térmicas para frequência 99,0%

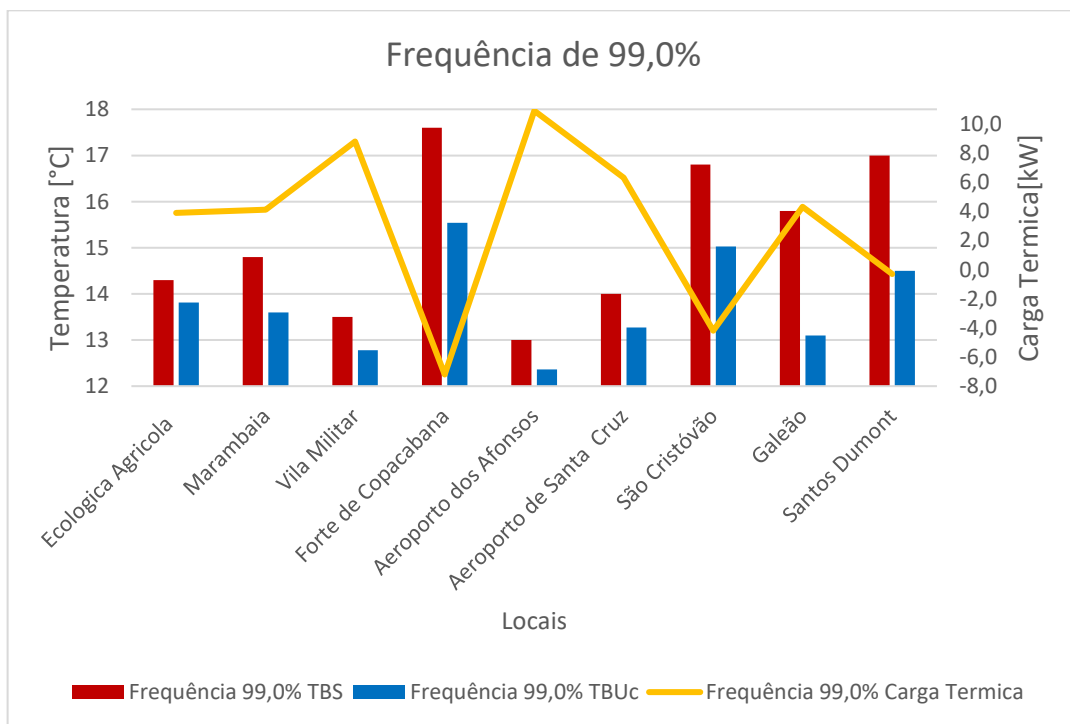


Figura 27 – Temperatura e carga térmica de 99,0%

Os menores valores de TBS e TBUC ocorreram no Aeroporto dos Afonsos e na Vila Militar, o que ocasionou nos maiores valores de carga térmica de aquecimento. O Forte de Copacabana apresentou as maiores TBS e TBUC e teve os menores valores de carga térmica de aquecimento.

#### 4.4. Variação Máxima de Temperatura

As médias das amplitudes diárias de temperatura do mês mais quente, apresentaram valores maiores nas estações meteorológicas mais ao norte (Ecológica Agrícola, Vila Militar e aeroporto dos Afonsos) com exceção do aeroporto Antônio Carlos Jobim. Esta exceção se justifica pela proximidade do mar desta última. As estações com menor amplitude térmica foram Forte de Copacabana, São Cristóvão e Santos Dumont, que são mais próximas do litoral e da Baía de Guanabara. Analisando a carga térmica de pico e a amplitude média de temperatura diária, não foram observadas ligações diretas ou proporcionalidades entre os valores.

A figura 28 mostra a média das variações máximas de temperatura dos meses mais quentes para cada estação meteorológica.

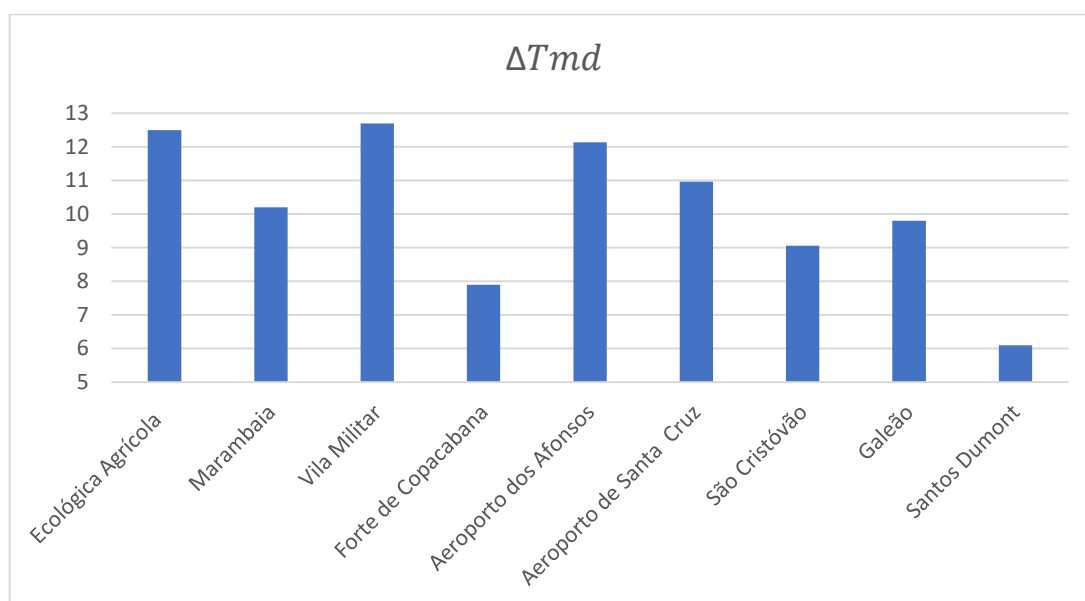


Figura 28 – Comparação entre as variações de  $\Delta T_{md}$ .

## 5. CONCLUSÕES

### 5.1. Considerações Finais

Todos os cálculos de carga térmica de resfriamento usando os dados climáticos produzidos neste estudo resultaram em valores inferiores aos realizados com os dados climáticos apresentados pela norma brasileira NBR 16401, com exceção de um único caso. Constatou-se assim que os dados de projeto da NBR16401 são conservadores. Com a atual e crescente preocupação com a eficiência energética e os custos operacionais, o superdimensionamento passou a ser uma condição indesejada.

As estações com maior TBUc produziram maiores valores de carga térmica de resfriamento, dando um caráter secundário à TBS. Somente quando os valores de TBUc eram próximos, TBS passou a hierarquizar as cargas térmicas entre as estações. O caso extremo ocorreu na estação do Aeroporto de Santa Cruz na frequência de 2%, quando um valor alto de TBUc fez com que a carga térmica calculada ultrapassasse a correspondente calculada pela NBR16401.

Este estudo não foi direcionado a identificar ilhas de calor no município do Rio de Janeiro, portanto os dados aqui produzidos não são suficientes para avaliar a sua existência. Foi observado um gradiente crescente de TBS na direção norte, que somente decresceu para a estação Ecológica Agrícola. Este decréscimo também foi observado por Silva (2010) ao comparar as estações aeroporto dos Afonsos e Ecológica Agrícola, que atribuiu isto ao fenômeno de ilha de calor.

Este estudo não incluiu na análise os dados de intensidade e direção dos ventos, que podem influenciar de forma significativa o resfriamento da edificação. Portanto este trabalho teve um caráter conservador neste sentido. De forma indireta, os ventos influenciaram os valores de TBS medidos nas estações consideradas.

Finalmente, cabe ao projetista avaliar se os dados da estação meteorológica mais próxima são de fato representativos do clima do local da construção, por exemplo os dados da estação do Forte de Copacabana situada na ponta do Arpoador não representam o clima no interior do bairro.

## 5.2. Trabalhos Futuros

Trabalhos futuros poderão abranger períodos mais longos e incluir períodos mais recentes para que possa ser avaliada a evolução temporal dos dados climáticos.

Dados das estações meteorológicas próximas às analisadas ou outras localizadas na região metropolitana do Rio de Janeiro poderão ser incluídos para refinar a malha espacial dos dados para o projeto.

Outro tema para estudo seria a construção de anos meteorológicos típicos (TMY) para uma análise do desempenho energético e econômico anual do sistema de ar condicionado. Com estes dados, diversas configurações do sistema de AVAC poderiam ser testadas na busca do arranjo mais econômico.

Este estudo poderá ser feito utilizando dados meteorológicos obtidos por sensoriamento remoto em substituição ao uso das estações meteorológicas, proporcionando assim uma distribuição espacial contínua dos dados de projeto na região de estudo.

Os regimes dos ventos devem ser incluídos em trabalhos futuros e os resultados assim gerados poderão ser comparados com aqueles aqui produzidos.

Finalmente, métodos de processamento de dados climáticos distintos daqueles recomendados pela ASHRAE poderão ser adotados.

## REFERÊNCIAS

ANEEL. Agência Nacional de Energia Elétrica - Consumo de Energia Referencia Consumo. Atlas de Energia Elétrica do Brasil, Cap 7. Parte I, 2008

AGÊNCIA NACIONAL DE VIGILÂNCIA SANITÁRIA – ANVISA. Resolução 9: Referenciais de Qualidade do Ar Interior em Ambientes Climatizados Artificialmente de Uso Público e Coletivo, 2003.

AKTACIR, M. A., BÜYÜKALACA, O., BULUT, H., YILMAZ, T. *Influence of different outdoor design conditions on design cooling load and design capacities of air conditioning equipments*. Energy Conversion and Management, v. 49, p.1766–1773, 2008.

AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING, AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS – ASHRAE. Fundamentals 2013. Atlanta, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NOMAS TÉCNICAS - ABNT. NBR 15220: Desempenho térmico das edificações. Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NOMAS TÉCNICAS - ABNT. NBR 16401: Instalações de ar condicionado – sistemas centrais e unitários. Rio de Janeiro, 2008.

BUENO, B., ROTH, M. NORFORD, L., LI, R. *Computationally efficient prediction of canopy level urban air temperature at the neighbourhood scale*, Urban Climate, v.9, p. 35-53, 2014.

BULUT, H., BÜYÜKALACA, O., YILMAZ, T. *New outdoor cooling design data for Turkey*, Energy, v.27, p.923–946, 2002.

CARMO, A. T., PRADO, R.T.A. *Qualidade do ar interno*, Texto Técnico da Escola Politécnica da USP, Departamento de Engenharia de Construção Civil, p.35, USP, São Paulo, SP, 1999

CARMO, F.A. *Simulação Computacional do Desempenho Energético da Edificação Laboratorial, Radial 8, do CENPES/PETROBRAS*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica – Universidade do Estado do Rio de Janeiro - UERJ). Rio de Janeiro, RJ, 2017.

CEPERJ. Fundação Centro Estadual de Estatísticas, Pesquisas e Formação de Servidores Públicos do Rio de Janeiro, 2013.

CHEN, T., YU, Z. *A statistical method for selection of sequences of coincident weather parameters for design cooling load calculations*, Energy Conversion and Management, v. 50, p. 813–821, 2009.

COLLIVER, D.G., GATES, R.S., ZHANG, H., BURKS, T., PRIDDY, K.T. *Final Report for Updating the Tables of Design Weather Conditions in the ASHRAE Handbook - Fundamentals (890-RP)*, 1998

COSTA, A. C. L., MATTOS, A. *Estudo da Ilha de Calor Urbana em Cidade de Grande Porte na Região Equatorial*. Congresso Brasileiro de Meteorologia, v. 1, 1998

DANFOSS. *Normatização do setor de HVAC em prol da eficiência energética*, Revista Solutions, ano 07, n. 27, 2015

ERELL, E. WILLIAMSON, T. *Intra-urban differences in canopy layer air temperature at a mid-latitude city*. International Journal of Climatology, v. 27, p. 243–255, 2007

EPE. Balanço Energético Nacional - Empresa de Pesquisa Energética, Brasília: Ministério de Minas e Energia, Relatório técnico, 2017.

EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, Relevo da região metropolitana do estado do Rio de Janeiro, monitoramento por satélite, 2017.

FARIAS, H.S. *O Ritmo Semanal do Ciclo no Bairro Maracanã*. Dissertação (Mestrado em Geografia - Instituto de Geociências - Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ). Rio de Janeiro, RJ, 2007.

GEDZELMAN, S.D., AUSTIN, S., CERMAK, R., STEFANO, N., PARTRIDGE, S., QUESENBERRY, S., ROBINSON, D. A. *Mesoscale aspects of the Urban Heat Island around New York City*, Theoretical and Applied Climatology, v. 75, p. 29–42, 2003.

GUIMARÃES, J.M. *Circulações locais na Região Metropolitana do Rio de Janeiro: Aspectos observacionais com base na análise de séries espaço-temporais*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil – Universidade Federal do Rio de Janeiro – COPPE/UFRJ). Rio de Janeiro, RJ, 2014.

HAP. *Hourly Analysis Program*, versão: 4.9.1, Carrier, 2016

HUBBARD, K.G., KUNKEL, K.E., DEGAETANO, A.T., REDMOND, K.T. *Sources of Uncertainty in the Calculation of Design Weather Conditions*, ASHRAE, RP-1171, 2004

KANDA, M. *Progress in the scale modeling of urban climate: Review*, Theoretical and Applied Climatology, v. 84, p.23-33, 2006.

KARAM, H.A., PEREIRA FILHO, A.J., MASSON, V., NOILHAN, J., MARQUES FILHO, E.P. *Formulation of a tropical town energy budget (t-TEB) scheme*, Theoretical Applied Climatology, v. 101, p.109–120, 2010.

LANDSBERG, H.E. *The Climate of Towns, in Man's role in changing the face of the earth*. Thomas W. L, p. 584-603, 1956.

LI, B., LI, W., LIU, H., YAO, R., TAN, M., ING, S., MA, X. *Physiological expression of human thermal comfort to indoor operative temperature in the non-HVAC environment*. Indoor Built Environ, v. 19, p. 221–229, 2010.

LUCENA, A.J. *A ilha de calor na Região Metropolitana do Rio de Janeiro*. Tese (Doutorado em Engenharia Civil – Universidade Federal do Rio de Janeiro – COPPE/UFRJ), Rio de Janeiro, RJ, 2012.

MARQUES FILHO, E.P., KARAM, H.A., MIRANDA, A.G., FRANÇA, J.R.A. *Rio de Janeiro's urban climate*, Urban Climate News - Quarterly Newsletter of the International Association of Urban Climate, v. 32, p.5-9, 2009.

MOCHTAR, S., ZR, L.D. *Application of Bioclimatic Parameter as Sustainability Approach on Multi-story Building Design in Tropical Area*. Procedia Environmental Sciences, v. 17, p. 822–830, 2013.

MOURA, J.R.S., ANTUNES, F.S., SAMPAIO, A.C., BARBOSA, D.R., SANTOS, H.M., RAMALHO, R.S., GUEDES, R.S. C., GAMA, S.V.G. *Modificações Sócio Ambientais e Zoneamento de Risco na Zona Oeste do Rio de Janeiro*. Relatório Parcial do Projeto Interinstitucional: O Porto de Sepetiba – Cenário, Impactos e Perspectivas, p. 48, 1998

OKE, T.R. *The energetic basis of the urban heat island*. Journal of the Royal Meteorological Society, v. 108, p. 1 –24, 1982.

OKE, T.R. *Boundary Layer Climates*, Methuen Co, ed.2, 1987.

OLESON, K.W., BONAN, G.B., FEDDEMA, J., JACKSON, T. *An examination of urban heat island characteristics in a global climate model*, International Journal of Climatology, v.31, p. 1848–1865, 2011.

PIMENTEL, L.C.G., MARTON, E., SILVA, M.S., JOURDAN, P. *Caracterização do regime de vento em superfície na Região Metropolitana do Rio de Janeiro*. Engenharia Sanitária e Ambiental, v.19, n.2, p. 121-132, 2014.

SANTAMOURIS, M. ASIMAKOPOULOS, D.N. *Energy and Climate in the Urban Built Environment*, James & James Science Publishers Ltd., London, 2001

SILVA, F.B. *Estudo de Ilha de Calor na Região Metropolitana do Rio de Janeiro: Aspectos das Circulações Locais com Utilização do Modelo Atmosférico BRAMS*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica – Universidade Federal do Rio de Janeiro –COPPE/UFRJ). Rio de Janeiro, RJ, 2010.

SZOKOLAY, S.V. *Introduction to Architectural Science: The Basis of Sustainable Design*, Elsevier Architectural Press, ed. 2, 2008.

THEOPHILOU, M.K., SERGHIDES, D. *Estimating the characteristics of the Urban Heat Island Effect in Nicosia, Cyprus, using multiyear urban and rural climatic data and analysis*. *Energy and Buildings*, v. 108, p. 137–144, 2015.

VERBAI, Z., KOCSIS, I., KALMÁR, F. *Outdoor dry bulb heating design temperatures for Hungary*, *Energy*, v. 93, p. 1404-1412, 2015.

VOOGT, J.A. *Urban Heat Island, Causes and consequences of global environmental change*, *Encyclopedia of Global Environmental Change*, v. 3, p. 660-666, 2002.

## APÊNDICE A – Propriedade térmica dos materiais

Tabela 18 – Parede externa de alvenaria de 200 mm

Parede Externa do tipo Alvenaria de 200 mm					
Detalhes da parede					
Cor da Superfície Externa	Média				
Absortividade	0,675				
Coeficiente global U	3,051	W/m <sup>2</sup> .K			
Detalhes das camadas da parede					
Camadas	Espessura	Massa Específica	Calor Específico	Coeficiente R	Peso Específico
	mm	kg/m <sup>3</sup>	kJ/(kg.K)	(m <sup>2</sup> .K)/W	kg/m <sup>2</sup>
Resistência da superfície interna	0,000	0,0	0,00	0,13000	0,0
Argamassa	25,000	2100,0	1,00	0,02170	52,5
Concreto	200,000	2400,0	1,00	0,11430	480,0
Argamassa	25,000	2100,0	1,00	0,02170	52,5
Resistência da superfície externa	0,000	0,0	0,00	0,04000	0,0
Totais	250,000	-		0,32770	585,0

Tabela 19 – Parede interna de alvenaria de 150 mm

Parede Interna do tipo Alvenaria de 150 mm					
Detalhes da parede					
Cor da Superfície Externa	Média				
Absortividade	0,675				
Coeficiente global U	3,343	W/m <sup>2</sup> .K			
Detalhes das camadas da parede					
Camadas	Espessura	Massa Específica	Calor Específico	Coeficiente R	Peso Específico
	mm	kg/m <sup>3</sup>	kJ/(kg.K)	(m <sup>2</sup> .K)/W	kg/m <sup>2</sup>
Resistência da superfície interna	0,000	0,0	0,00	0,13000	0,0
Argamassa	25,000	2100,0	1,00	0,02170	52,5
Concreto	150,000	2400,0	1,00	0,08570	360,0
Argamassa	25,000	2100,0	1,00	0,02170	52,5
Resistência da superfície externa	0,000	0,0	0,00	0,13000	0,0
Totais	200,000	-		0,38910	465,0

Tabela 20 – Telhado

Cobertura com Telha					
Detalhes da parede					
Cor da Superfície Externa	Média				
Absortividade	0,675				
Coeficiente global U	0,487	W/m <sup>2</sup> .K			
Detalhes das camadas da parede					
Camadas	Espessura	Massa Específica	Calor Específico	Coeficiente R	Peso Específico
	mm	kg/m <sup>3</sup>	kJ/(kg.K)	(m <sup>2</sup> .K)/W	kg/m <sup>2</sup>
Forro Modular	30,000	2200,0	0,84	0,03160	66
Espaço de ar	600,000	0,0	0,00	0,21000	0,0
Concreto	100,000	1800,0	1,00	0,11430	360
Espaço de ar	100,000	0,0	0,00	0,21000	0
Telha metálica	2,000	2700,0	0,88	0,00001	2,7
Poliuretano	40,000	40	1,00	1,33333	1,6
Telha metálica	2,000	2700,0	0,88	0,00001	2,7
Totais	874,000	-		2,05000	253,0

Tabela 21 – Composição da janela

Detalhes da janela	
Altura	1,0 m
Largura	1,0 m
Tipo de armação	Alumínio com divisórias térmicas
Sombreamento interno	Cortina de rolo - Escura - Opaca
Coeficiente global U	5,7 W/m <sup>2</sup> .K
Coeficiente de sombreamento	0,44

Tabela 22 – Composição da porta exterior

Porta externa		
Detalhes da porta		
Área	2,9	m <sup>2</sup>
Coeficiente global U	2,163	W/(m <sup>2</sup> .K)
Coeficiente de sombreamento	0,44	