

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

OBTENÇÃO DE DIAS DE PROJETO PARA CARGA TÉRMICA DE CONDICIONADOR DE AR

por

Daniel de Souza Labres

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

Porto Alegre, novembro de 2015



Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Escola de Engenharia

Departamento de Engenharia Mecânica

OBTENÇÃO DE DIAS DE PROJETO PARA CARGA TÉRMICA DE CONDICIONADOR DE AR

por

Daniel de Souza Labres

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE

ENGENHEIRO MECÂNICO

APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Dr. Alcy Rodolfo dos Santos Carrara

Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: **Ciências Térmicas**

Orientador: Prof. Dr. Paulo Otto Beyer

Comissão de Avaliação:

Prof. Dr. Bardo Ernst Josef Bodmann

Profa. Dra. Letícia Jenisch Rodrigues

Profa. Dra. Thamy Cristina Hayashi

Porto Alegre, novembro de 2015.

LABRES, D. S. **Obtenção de Dias de Projeto para Carga Térmica de Condicionador de Ar**. 2015. 20 folhas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

RESUMO

Este trabalho apresenta um estudo sobre o parâmetro Dia de Projeto, envolvendo suas aplicações, formas de obtenção, critérios adotados e a influência do mesmo em projetos de carga térmica. É proposta uma análise diferenciada para dados contidos nele, como temperatura de bulbo seco, umidade, irradiação e vento, entre outros, o que culmina na definição de um Dia de Projeto próprio, o qual é posteriormente comparado com as informações disponíveis em tabelas da ASHRAE, verificando-se semelhanças e diferenças e possíveis causas das mesmas. Ao final, tanto o Dia de Projeto obtido quanto o da ASHRAE são utilizados em uma simulação computacional simples, envolvendo cálculo de carga térmica e dimensionamento de um condicionador de ar, na qual se verifica considerável redução da potência e vazão de ar requeridas ao equipamento com aplicação dos Dias de Projeto produzidos, além de evidenciar pontos na metodologia da ASHRAE que não condizem com o que se encontra em situações reais.

PALAVRAS-CHAVE: (Obtenção de Dia de Projeto, Carga Térmica para Condicionador de Ar, Dia de Projeto ASHRAE).

LABRES, D. S. **Obtaining Design Days for Air Conditioning Thermal Load**. 2015. 20 folhas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

ABSTRACT

This work presents a study on the parameter Design Day, involving its applications, methods of obtainment, adopted criteria and its influence on Thermal Load projects. It is proposed a differentiated analysis for data present on it, like dry bulb temperature, humidity, irradiation and wind, among others, that culminates in the establishment of a new, produced Design Day, which is afterwards compared with the information available in tables from ASHRAE, verifying similarities and differences, as well as its possible causes. In the end, the obtained Design Day and ASHRAE's data are used in a simple computational simulation, involving thermal load and design for an air conditioner, in which is observed a substantial reduction of required power and air flow for the equipment with the utilization of the produced Design Days, besides pointing elements on ASHRAE's methodology that do not correspond to what is found in real situations.

KEYWORDS: (Design Day Establishment, Air Conditioner Thermal Load, ASHRAE Design Day).

ÍNDICE

	Pág.
1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVOS	2
3. METODOLOGIA E FUNDAMENTOS.....	2
3.1. Parâmetros de um Dia de Projeto.....	2
3.2. Os Dias de Projeto ASHRAE.....	4
4. DESENVOLVIMENTO DOS DIAS DE PROJETO PRÓPRIOS.....	7
4.1. O Arquivo Climático.....	7
4.2. Escolha das Localidades.....	7
4.3. Parâmetros adotados.....	7
4.3.1. Pontos de trabalho.....	8
4.3.2. Perfis de Temperatura e Radiação.....	9
4.3.3. Data.....	10
4.3.4. Vento.....	10
5. SIMULAÇÃO E RESULTADOS.....	11
6. CONCLUSÕES.....	14
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	15
ANEXO I - Localização dos municípios avaliados nas zonas climáticas do território brasileiro.....	16
APÊNDICE I - Perfis de TBS para Dias de Projeto produzidos, para Porto Alegre.....	17
APÊNDICE II - Perfis de TBU para Dias de Projeto produzidos, para Porto Alegre.....	18
APÊNDICE III - Perfis de irradiação para dias de projeto produzidos, para Porto Alegre.....	19
APÊNDICE IV - Análise das menores amplitudes de temperatura para cada cidade.....	20

1. INTRODUÇÃO

No projeto ou aprimoramento de máquinas e equipamentos que executem funções de aquecimento, resfriamento, ventilação, condicionamento de ar, desumidificação ou outros processos relacionados à energia, é imprescindível o conhecimento das condições climáticas do ambiente externo. No entanto, estas condições variam conforme a localidade e período do ano, fazendo-se necessária a adoção de um procedimento de seleção que determine as circunstâncias climáticas mais críticas nas quais o sistema poderá operar com sucesso.

Um Dia de Projeto (*Design-Day*) consiste numa compilação de informações climatológicas referentes a um período de 24 horas no qual estas condições críticas se fazem presentes. Trata-se de uma concepção teórica, uma vez que os dados nele contidos não correspondem aos dados de um dia real. Os parâmetros presentes nele são, na verdade, obtidos por cálculos baseados em medições realizadas em diferentes datas.

Os Dias de Projeto têm vasta aplicação para a engenharia, sendo utilizados, entre outras coisas, na definição do *design*, dimensionamento, distribuição, instalação e *marketing* do produto, seja para o uso residencial, agrícola, comercial ou industrial. Softwares de simulação computacional, como o *EnergyPlus*[®], empregam os parâmetros de um Dia de Projeto como dados de entrada em seus cálculos de carga térmica, sendo que há a possibilidade do usuário editá-los, conforme seus interesses.

A ASHRAE (*American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers*) publica anualmente, na edição digital de seus manuais, tabelas com parâmetros de dias de projeto para inúmeras cidades ao redor do mundo. Na metodologia utilizada pela ASHRAE, não existe um único Dia de Projeto para cada localidade, existem vários. Qual será aplicado depende de qual é o parâmetro crítico (temperatura, umidade, etc.) levado em conta e qual a frequência aceitável de excedência de seu valor-limite. Por exemplo, se a frequência aplicada for 1%, isso significa que, ao longo de 1 ano (8760 h), o parâmetro atingirá um valor superior ao do Dia de Projeto durante, em média, 1% do tempo (88 h). Neste período uma máquina projetada seria incapaz de suprir toda a carga térmica requerida, ela supriria apenas parcialmente, ou seja, o ambiente chegaria próximo à zona de conforto térmico, mas ela não seria plenamente atingida.

Ainda que sejam as mais comumente aplicadas fontes de informações sobre Dias de Projeto que se tem à disposição, as tabelas da ASHRAE e o procedimento de obtenção das mesmas possuem alguns pontos que chamam a atenção. Por exemplo, para dias de verão a amplitude de temperatura dada é a média calculada para um mês inteiro, e não apenas para os dias críticos. Parâmetros como velocidade do vento e direção do vento estão em situação similar. Os parâmetros perfil de temperatura horário, data de ocorrência e radiação solar incidente também apresentam simplificações na sua forma de obtenção.

Outro aspecto notável é a desconsideração de variação de temperatura em dias de condições frias (para estes a temperatura crítica é imaginada como constante ao longo das 24 horas). Isso é questionável a ponto de que a própria Associação Brasileira de Normas Técnicas, ABNT, determina, para avaliação do desempenho

térmico de edificações, a utilização de condições de inverno nas quais a temperatura varia [ABNT, 2012]

2. OBJETIVOS

O objetivo principal deste trabalho consiste em desenvolver Dias de Projeto próprios a partir de arquivos climáticos, para diferentes localidades do território brasileiro. A metodologia utilizada é baseada na da ASHRAE, mas busca minimizar a presença de simplificações e generalizações na obtenção dos dados, procurando se obter o máximo de fidelidade em relação às condições encontradas em dias críticos reais.

Deve ser efetuada uma análise comparativa entre os valores obtidos e aqueles encontrados nas tabelas da ASHRAE, a fim de verificar se o uso de uma nova abordagem gera diferenças significativas, em quais parâmetros estas diferenças ocorrem e quais suas causas. Subsequentemente, tanto os dias aqui definidos quanto os da ASHRAE são aplicados em simulações computacionais para cálculo de carga térmica e dimensionamento de equipamentos condicionadores de ar e, novamente, diferenças são averiguadas.

3. METODOLOGIA E FUNDAMENTOS

3.1. PARÂMETROS DE UM DIA DE PROJETO

Existe mais de um Dia de Projeto por localidade. Além da divisão entre dias de verão e de inverno, eles se diferenciam pelo parâmetro principal empregado. Este é o parâmetro que será analisado no seu valor máximo ou mínimo ao longo do ano (desconsiderando a frequência aceitável de excedência). O parâmetro principal é que dá nome ao Dia de Projeto, todos os demais componentes são obtidos verificando-se as ocasiões do ano em que esse parâmetro tem seu valor crítico.

Parâmetros usualmente aplicados como principal incluem: temperatura de bulbo seco (*TBS*), temperatura de bulbo úmido (*TBU*), conteúdo de umidade (*W*), entalpia específica (*h*) e velocidade do vento, cada um gerando um Dia de Projeto diferente. Numa simulação computacional convencional, todos os Dias de Projeto são utilizados. Aquele que fornece o maior valor de carga térmica requerida é escolhido para o dimensionamento do(s) equipamento(s). Porém, este cálculo é efetuado individualmente para cada zona a ser climatizada na edificação. É possível que uma zona tenha seu equipamento dimensionado para um determinado Dia de Projeto e, para a zona seguinte, o dia seja outro. O mais comum, no entanto, é que os Dias de Projeto para *TBS* (tanto de verão quanto de inverno) resultem nas maiores cargas.

Independente de qual for o Dia de Projeto aplicado, o cálculo da carga térmica requer o conhecimento dos valores de temperatura de bulbo seco e umidade, na condição crítica. Dessa maneira, o programa aplicado pode posicionar o ponto mais crítico do dia na carta psicrométrica e definir a potência necessária para trazê-lo à zona de conforto térmico. Portanto, para o dia *TBS* é necessário escolher algum parâmetro que identifique umidade (*TBU*, *W* ou *h*) e determinar qual o seu valor quando a temperatura de bulbo seco é crítica, enquanto que para os dias *TBU*, *W* e *h* deve-se determinar a *TBS* presente durante a umidade ou entalpia específica críticas.

A variação da *TBS* ao longo do Dia de Projeto também é um parâmetro frequentemente considerado. A forma mais usual de considerá-la é através da curva de perfil de temperatura diário, fornecida pela ASHRAE, que pode ser vista na Figura 3.1. Com ela, sabendo-se a amplitude de temperatura no dia (diferença entre as temperaturas máxima e mínima), é possível estimar a temperatura para qualquer hora do dia, pela equação:

$$T_{HORA} = T_{MÁX} - T_{AMP} * f \quad (3.1)$$

na qual, T_{HORA} é a temperatura para uma hora qualquer do Dia de Projeto, $T_{MÁX}$ é a temperatura no ponto crítico do dia, T_{AMP} é a amplitude de temperatura do dia e f é o fator multiplicador, obtido do gráfico. Note-se que o perfil determinado implica uma temperatura máxima sempre às 14 e 15 horas e mínima às 5 horas. Ele é válido somente para os dias de projeto de verão, não havendo perfil conhecido para dias de inverno. A curva e a equação também são aplicáveis para determinar a distribuição diária de TBU [EnergyPlus, 2013a].

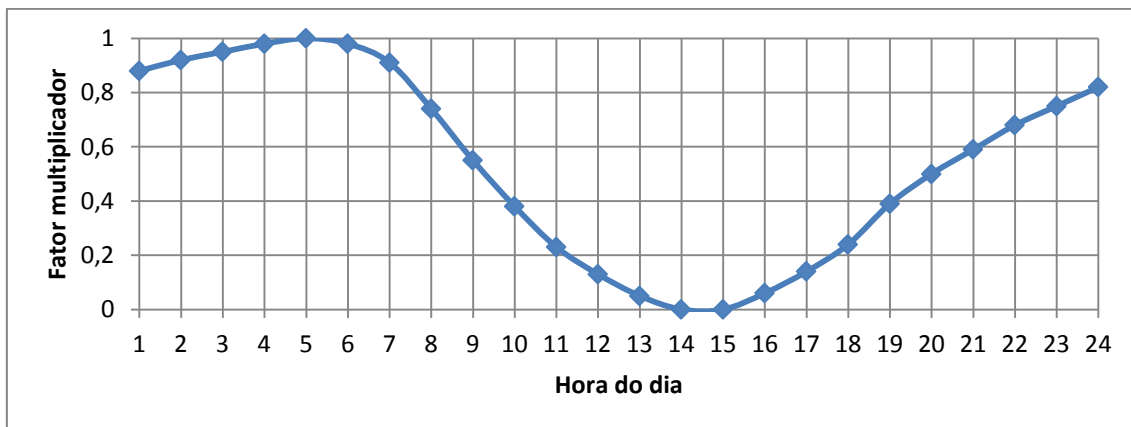


Figura 3.1 – Curva para determinação do perfil de temperatura padrão para dias de projeto de verão [EnergyPlus, 2013a].

O programa *EnergyPlus*[®] permite que, além do perfil pré-determinado já apresentado, o usuário possa utilizar seus próprios perfis (*schedules*), onde ele próprio determina um valor fixo para cada hora do dia. No entanto, só é possível aplicar em simulações perfis diários de *TBS* e de *TBU*, não havendo possibilidade de fazer o mesmo para *W* e *h* (os Dias de Projeto obtidos a partir desses parâmetros acabam considerando a umidade como constante ao longo de todo o dia, variando apenas a *TBS*). A aplicação de *schedules* é válida também para Dias de Projeto de inverno.

Definir uma data (dia e mês) para ocorrência do Dia de Projeto também é requerido nos cálculos, uma vez que só assim é possível determinar a posição apropriada da edificação a ser calculada, em relação ao sol. Direção e velocidade média do vento presente no dia também são levadas em conta, pois influenciam na ventilação natural e na troca de calor por convecção nas paredes externas.

Por fim, inclui-se no Dia de Projeto informações referentes à radiação solar incidente na edificação. A radiação divide-se em direta e difusa. Assim como ocorre para TBS, o *EnergyPlus*[®] permite ao usuário montar seus próprios *schedules* diários para estes dois parâmetros, estabelecendo valores fixos para cada hora do dia. Quando não se tem acesso a dados assim, no entanto, existem outras abordagens possíveis disponíveis.

Pode-se selecionar os modelos ASHRAEClearSky ou ZhangHuang, nos quais se atribui um valor que representa a quantidade de nuvens no céu para o dia, onde 0,0 equivale a um céu totalmente encoberto e 1,0 representa um céu totalmente limpo, em localizações a nível do mar. Valores maiores que 1,0 podem ser aplicados para locais de altitude elevada. Este valor é combinado com a data do dia, definida acima, para estimar a radiação presente.

Também se pode utilizar o modelo ASHRAETau, desenvolvido em 2009, que faz uso da massa de ar (adimensional), calculada pela equação:

$$m = 1/[\text{sen}\beta + 0,50572 * 6,07995 + \beta^{-1,6364}] \quad (3.2)$$

na qual β é a altitude solar do local abordado (em graus). Esse valor, por sua vez, é usado para se obter os parâmetros irradiação normal e irradiação difusa, através de:

$$E_b = E_o * \exp[-\tau_b * m^{ab}] \quad (3.3)$$

$$E_d = E_o * \exp[-\tau_d * m^{ad}] \quad (3.4)$$

na qual E_b é a irradiância normal (em W/m^2), E_d é irradiância difusa (em W/m^2), E_o é a irradiância extraterrestre normal definida pela data (em W/m^2), τ_b e τ_d são as profundidades óticas normal e difusa (adimensionais, fornecidas pelo Dia de Projeto ASHRAE, para cada mês) e ab e ad são valores dados por:

$$ab = 1,219 - 0,043 * \tau_b - 0,151 * \tau_d - 0,204 * \tau_b * \tau_d \quad (3.5)$$

$$ad = 0,202 + 0,852 * \tau_b - 0,007 * \tau_d - 0,357 * \tau_b * \tau_d \quad (3.6)$$

Atualmente, o procedimento padrão do *EnergyPlus*[®] é aplicar, para dias de inverno, o modelo ASHRAEClearSky com valor 0,0 e, para dias de verão, o modelo ASHRAETau, com τ_b e τ_d selecionados para o mês mais quente. A própria ASHRAE reconhece que estes modelos oferecem uma abordagem bastante conservadora [*EnergyPlus*, 2013b].

3.2. Os Dias de Projeto ASHRAE

Anualmente a ASHRAE publica em seu manual “*Handbook – Fundamentals*”, na versão digital, tabelas fornecendo dados de Dias de Projeto para diversas localidades ao redor do mundo. Tais dados são obtidos a partir das tomadas de medida fornecidas pelo NCDC (*National Climatic Data Center*), para um período de 25 anos (quando possível, caso contrário utilizam-se períodos menores), obedecendo-se critérios de qualidade descritos nos manuais.

Tabela 3.1. - Condições de Dias de Projeto para Porto Alegre [ASHRAE, 2013]

Lat: 30,00S	Long: 51,18W	Alt: 3	P _{Padrão} : 101,29			Fuso: -3,00	Período: 86-10	WMO: 833780							
Condições de Projeto Anuais de Aquecimento e Umidificação															
Mês mais frio	Aquecimento TBS		Umidificação TO/TBSCM e W						Mês mais frio VV/TBSCM				VVCM/DVCP para TBS 99,6%		
			99,6%			99%			0,4%		1%				
	99,6%	99%	TO	W	TBSC M	TO	W	TBSC M	VV	TBSC M	VV	TBSC M	VVCM	DVCP	
7	3,9	5,8	1,1	4,1	8,2	2,9	4,7	8,5	10,1	11,8	8,8	13,8	1,0	300	
Condições de Projeto Anuais de Resfriamento, Desumidificação e Entalpia															
Mês mais quente	Amp. TBS Mês mais quente	Resfriamento TBS/TBUCM						Evaporação TBU/TBSCM						VVCM/DVCP para TBS 0,4%	
		0,4%		1%		2%		0,4%		1%		2%			
		TBS	TBU CM	TBS	TBU CM	TBS	TBU CM	TBU	TBSC M	TBU	TBSC M	TBU	TBSC M	TBS CM	VV CM
1	9,7	34,7	24,6	33,0	24,0	31,8	23,6	26,4	31,3	25,6	30,4	25,0	29,4	3,5	300
Desumidificação TO/TBSCM e W									Entalpia/TBSCM						
0,4%			1%			2%			0,4%		1%		2%		
TO	W	TBS CM	TO	W	TBS CM	TO	W	TBSC M	h	TBSC M	h	TBSC M	h	TBSCM	
25,1	20,2	28,4	24,2	19,1	27,4	23,8	18,7	27,0	82,2	31,5	78,8	30,4	76,1	29,5	
		Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez		
Taub		0,400	0,388	0,358	0,338	0,314	0,321	0,321	0,395	0,408	0,443	0,393	0,409		
Taud		2,59	2,60	2,64	2,59	2,56	2,46	2,46	2,26	2,31	2,29	2,54	2,54		

Tabela 3.2. – Nomenclatura dos termos usados na tabela ASHRAE [ASHRAE, 2013]

Alt	Altitude, m
DVCP	Direção do Vento Coincidente Predominante, ° (0°=Norte; 90°=Leste)
Fuso	Fuso horário GMT, h
h	Entalpia específica, kJ/kg
Lat	Latitude, °
Long	Longitude, °
Período	Anos levados em conta nos cálculos
P _{Padrão}	Pressão padrão na altitude local, kPa
TAUB	Profundidade ótica normal, adimensional
TAUD	Profundidade ótica difusa, adimensional
TBS	Temperatura de Bulbo Seco, °C
TBSCM	Temperatura de Bulbo Seco Coincidente Média, °C
TBU	Temperatura de Bulbo Úmido, °C
TBUCM	Temperatura de Bulbo Úmido Coincidente Média, °C
TO	Temperatura do Ponto de Orvalho, °C
VV	Velocidade do Vento, m/s
VVCM	Velocidade do Vento Coincidente Média, m/s
W	Conteúdo de Umidade, g _w /kg _a
WMO	Número Identificador de Estação da World Meteorological Organization

Na edição 2013, abordada aqui, havia 6443 estações presentes. Nos manuais consta também o significado e forma de obtenção de cada parâmetro, assim como exemplos simples de aplicação. A porção das tabelas aplicável a Dias de Projeto é reproduzida na Figura 3.1, numa versão traduzida e editada pelo autor, tendo a cidade de Porto Alegre como exemplo. A versão completa, presente no Handbook, também oferece dados particularizados para cada mês do ano, mas isso não adentra o escopo desta pesquisa.

Na tabela da ASHRAE, as informações na primeira linha referem-se às características geográficas da estação: latitude, longitude, elevação, pressão padrão (em kPa), fuso horário e período de tomada dos dados (para 2013 o padrão é 1986-2010, sempre que disponível).

Os valores abaixo do campo “Condições de Projeto Anuais de Aquecimento e Umidificação” são para Dias de Projeto de inverno. Para estes dias, existem 3 parâmetros usados como principal: temperatura de bulbo seco (*TBS*), temperatura de orvalho/conteúdo de umidade (*TO/W*) e velocidade do vento (*VV*). Para cada um deles são apresentadas 2 opções de frequência de excedência aceitável e seu respectivo valor crítico associado. Lembrando que uma frequência de excedência de 99,6%, por exemplo, indica que, ao longo de 1 ano, em 99,6% do tempo o valor encontrado para aquele parâmetro será maior ou igual ao valor crítico mostrado.

Para os dias baseados em conteúdo de umidade e em velocidade do vento é apresentada uma temperatura de bulbo seco média coincidente, ou seja, a *TBS* média para os pontos do arquivo climático onde ocorre o valor crítico para *W* e *VV*. Note-se que para os dias *TBS* e *VV* não existem dados referentes à umidade. Isto implica, para estes dias, a temperatura de bulbo úmido ser considerada igual à de bulbo seco e, portanto, a umidade relativa é considerada como 100% (ao longo de todo o dia). A *TBS*, obtida para os pontos críticos também é considerada como não variando, pois não há perfil aplicável de distribuição de temperatura para dias de inverno.

Para os três Dias de Projeto são utilizados os mesmos valores de velocidade e direção do vento, calculados como a média presente nos dias onde é atingida a temperatura crítica do dia *TBS* com frequência 99,6%. A data utilizada para os três também é a mesma: dia 21 do mês mais frio (considerando temperatura média).

Mais abaixo destes, ocupando o restante da tabela, estão os valores para Dias de Projeto de verão. Da mesma forma que nos de inverno, eles também apresentam valores críticos relacionados a diferentes opções de frequência de excedência, que, nesse caso, são sempre 0,4%, 1% e 2%. *TBS*, *TBU*, *TO/W* e *h* são os parâmetros aplicados como principais. Velocidade e direção do vento são obtidas da média para o dia *TBS* com frequência 0,4%.

A variação da *TBS*, usada para determinação do perfil horário de temperaturas a partir da curva da ASHRAE, é dada pela média das amplitudes de temperatura nos dias do mês mais quente. O valor é o mesmo independente de qual o parâmetro principal do dia. A data aplicada é o dia 21 do mês mais quente. Ao final, aparecem os parâmetros *taub* e *taud*, utilizados no cálculo da irradiação solar pelo modelo ASHRAEtau, descrito na seção anterior.

4. DESENVOLVIMENTO DOS DIAS DE PROJETO PRÓPRIOS

4.1. O Arquivo Climático

Para filtragem dos parâmetros climáticos necessários para determinar os dados de um Dia de Projeto completo se faz necessário um arquivo que contenha as informações climáticas requeridas, para cada uma das cidades trabalhadas. Para esta função, escolheu-se trabalhar com os arquivos do tipo EPW obtidos no site do LABEEE – Laboratório de Eficiência Energética em Edificações, da UFSC. Nestes arquivos constam dados de um “ano típico” para 411 municípios brasileiros, com os parâmetros tomados de hora em hora.

Sua metodologia de obtenção foi a seguinte: dispondo-se de uma sequência de dados históricos de vários anos, para cada mês excluiu-se sucessivamente os anos mais quentes e mais frios até restar apenas um, considerado como o mês típico do lugar. Cada arquivo foi formado a partir de seus 12 meses selecionados, podendo estes ser de diferentes anos. Foram utilizados dados de instalações do INMET, coletados a partir do ano 2000. A última atualização se deu em 2012.

Para este estudo, além das referências temporais (ano, mês, dia e hora) são considerados sete parâmetros mensuráveis presentes nos arquivos climáticos. São eles temperatura de bulbo seco, temperatura de orvalho, pressão, direção do vento, velocidade do vento, radiação solar direta e radiação solar difusa. Além de sua utilização para definição dos dias de projeto, os arquivos EPW também são aplicados nas simulações computacionais do *EnergyPlus*[®].

4.2. Escolha das Localidades

A seleção dos locais analisados tem como princípio utilizar dados os mais diversos possíveis, a fim de verificar como esta metodologia para Dias de Projeto afeta cada lugar e se existem divergências geográficas quanto à aplicação da mesma. Procurou-se cidades economicamente relevantes, mas também que pudessem representar todas as regiões do território nacional e, mais importante, toda a diversidade climática do país. Mais detalhes a respeito estão presentes no Anexo I.

A escolha se deu por 8 municípios: Brasília, Manaus, Porto Alegre, Porto Velho, Rio de Janeiro, Salvador, São Luís e São Paulo. Esta seleção contempla cidades tanto no interior quanto próximas à costa, de diferentes altitudes, diferentes perfis de umidade e diferente incidência solar. Algumas destas cidades localizam-se próximas à linha do Equador, onde a influência das estações do ano não é tão sentida (o clima de verão ou de inverno não difere muito das demais épocas do ano), então cabe salientar que, neste relatório, o uso dos termos Dia de Projeto “de verão” e “de inverno” se dá meramente devido à convenção utilizada pela ASHRAE, pois se sabe que muitos dos dias críticos não ocorrem efetivamente dentro dessas duas estações.

4.3. Parâmetros adotados

Para realização de uma comparação adequada, os Dias de Projeto produzidos neste trabalho utilizam os mesmos parâmetros principais dos dias da tabela ASHRAE. São obtidos, portanto, para cada localidade, quatro Dias de Projeto de verão, baseados em temperatura de bulbo seco (*TBS*), temperatura de bulbo úmido (*TBU*),

conteúdo de umidade (W) e entalpia (h) e dois Dias de Projeto de inverno, baseados em TBS e W . O Dia de Projeto para velocidade do vento não é levado em conta aqui, pois não tem relevância para cálculos de dimensionamento de condicionadores de ar, sendo melhor aplicado para sistemas mais simples, que empregam apenas ventilação natural. Note-se que os parâmetros TBU , W e h não estão presentes no arquivo climático, mas podem ser calculados (para cada hora do ano) a partir de parâmetros que estão presentes, utilizando-se equações psicrométricas [BEYER, 2015].

A frequência de excedência admissível considerada é de 0,4% para dias de verão e 99,6% para dias de inverno. Essa é a frequência mais comumente empregada em projetos atualmente, principalmente em locais como o Brasil, onde as cargas térmicas de verão costumam ser mais expressivas que as de inverno. A abordagem conservadora se explica no fato de que arquivos climáticos compreendem um longo intervalo de tempo, então é provável que as condições críticas de verão encontradas hoje em dia sejam ainda mais intensas que as dadas por eles, visto que a temperatura do planeta vem aumentando nas últimas décadas [NCDC, 2015].

4.3.1. Pontos de trabalho

A metodologia para obtenção dos valores de temperatura e umidade nos pontos críticos não se difere em relação à da ASHRAE, apenas é adotado um rigor maior em relação à quantidade de dados com que se trabalha.

Tomemos como exemplo o dia TBS de verão para Porto Alegre. Para este dia, o valor da temperatura de bulbo seco crítica encontrado é $35,1^{\circ}\text{C}$. Contudo, este valor ocorre somente 2 vezes ao longo do ano, no arquivo climático. Trabalhar com uma amostragem tão pequena é arriscado e pode levar a resultados distorcidos: se esses 2 pontos apresentarem valores de umidade ou radiação muito díspares, a média entre eles resultaria numa condição não condizente nem com um ponto nem com o outro.

Para evitar situações assim se estabelece um critério: o valor crítico do parâmetro principal deve ocorrer pelo menos 5 vezes ao longo do ano. Se isso não acontece, estende-se os pontos críticos também aos valores imediatamente superior e inferior. Ou seja, para o exemplo acima seriam levados em conta todos os pontos do arquivo climático onde a TBS se encontra na faixa que vai de $35,0^{\circ}\text{C}$ a $35,2^{\circ}\text{C}$, totalizando 6 ocorrências. Observe-se que esta extensão de faixa de valores pode ser feita mais de uma vez, o importante apenas é que haja pelo menos 5 pontos com os quais operar.

Os pontos nos quais o parâmetro principal do Dia de Projeto está dentro dessa faixa são aqui denominados pontos de trabalho do dia. A Tabela 4.1, contendo o(s) valor(es) encontrados nos pontos de trabalho para cada Dia de Projeto, para Porto Alegre, e contendo também os parâmetros calculados pela média nesses pontos, pode ser vista abaixo.

Tabela 4.1 – Pontos de trabalho e parâmetros coincidentes para Dias de Projeto produzidos, para Porto Alegre.

	Verão			Inverno		
Dia TBS	Valor nos pontos de trabalho (°C)	TBU coincidente (°C)	N _o de pontos de trabalho	Valor nos pontos de trabalho (°C)	TBU coincidente (°C)	N _o de pontos de trabalho
	35,0 - 35,2	24,0	6	5,0	3,8	5
Dia W	Valor nos pontos de trabalho (g _w /kg _a)	TBS coincidente (°C)	N _o de pontos de trabalho	Valor nos pontos de trabalho (g _w /kg _a)	TBS coincidente (°C)	N _o de pontos de trabalho
	18,1	28,9	7	3,9	7,6	15
Dia TBU	Valor nos pontos de trabalho (°C)	TBS coincidente (°C)	N _o de pontos de trabalho			
	25,2	33,3	8			
Dia h	Valor nos pontos de trabalho (kJ/kg)	TBS coincidente (°C)	N _o de pontos de trabalho			
	76,5 - 76,9	33,8	9			

4.3.2. Perfis de Temperatura e Radiação

Em Para se determinar perfis (*schedules*) para um Dia de Projeto é necessário atribuir valores ao parâmetro para cada hora do dia. Isso não é possível apenas com os pontos de trabalho, é preciso empregar intervalos de 24 horas no cálculo, verificando-se como o parâmetro varia ao longo delas.

Para isso, primeiramente, toma-se intervalos centrados nos pontos de trabalho e que se estendem das 12 horas imediatamente anteriores a eles até as 11 horas imediatamente posteriores. Note-se que cada um destes intervalos não corresponde necessariamente a um dia real, apenas a uma sequência de 24 horas real.

Tendo feito isso para todos os pontos de trabalho do Dia de Projeto, calculam-se os valores médios do parâmetro para cada hora do dia (de 1 a 24). Perceba-se que diferentes intervalos nem sempre estão centrados na mesma hora-relógio, os cálculos de médias levam em conta apenas as horas-relógio onde os valores ocorrem (desconsiderando horário de verão), e não onde iniciam ou terminam os intervalos.

É importante frisar que diferentes pontos de trabalho para um mesmo Dia de Projeto podem ocorrer bem próximos um do outro, a ponto de que seus intervalos se interseccionem. Mesmo assim, para efeito de cálculo, ambos são considerados como independentes. Por conta disso, os valores que se interseccionam são adicionados aos cálculos de média 2 vezes, pois fazem parte de 2 intervalos.

Em tese, pode-se definir *schedules* para qualquer parâmetro climático, porém as simulações no *EnergyPlus* só permitem o emprego dos mesmos para *TBS*, *TBU*,

Irradiação Direta e Irradiação Difusa, portanto esses são os únicos perfis calculados. Representações gráficas desses perfis, para os dias *TBS* de verão e de inverno, para Porto Alegre, estão presentes nos Apêndices I, II e III.

4.3.3. Data

Para cada Dia de Projeto, entre as datas do ano onde ocorrem os pontos de trabalho seleciona-se aquela que está mais próxima da média entre elas. Novamente tomando o dia *TBS* de verão para Porto Alegre como exemplo, os pontos de trabalho estão presentes nos dias 14/12, 17/12, 12/1, 16/1, 16/3 e 17/3, o que resulta numa média localizada no dia 25/1. O dia com *TBS* crítica mais próximo deste é 16/1, portanto esta é a data considerada para ocorrência deste dia de projeto.

Na Tabela 4.2 constam as datas obtidas para os demais Dias de Projeto, para todas as cidades analisadas. Como já comentado, algumas dessas datas não fazem parte das estações de verão ou inverno, mas os Dias de Projeto adotam essa nomenclatura, por convenção.

Tabela 4.2 – Data aplicada para cada dia de projeto produzido, em diferentes localidades.

Cidade	Verão				Inverno	
	Dia TBS	Dia W	Dia h	Dia TBU	Dia TBS	Dia W
Brasília	29/10	8/1	1/1	11/2	29/7	10/8
Manaus	3/10	19/2	8/1	23/2	19/7	4/8
Porto Alegre	16/1	3/3	8/1	20/1	22/8	21/8
Porto Velho	7/10	21/11	27/12	6/12	27/7	5/8
Rio de Janeiro	17/1	30/12	11/2	24/1	19/7	22/7
Salvador	15/2	25/3	7/4	30/2	9/8	26/8
São Luiz	29/12	24/5	16/5	5/5	17/4	3/9
São Paulo	16/10	1/3	21/2	13/2	31/5	15/7

4.3.4. Vento

Para determinação dos parâmetros de vento também são observados os intervalos de 24 horas centrados nos pontos de trabalho. Todavia, neste caso não são efetuadas médias. Ao invés disso, verifica-se qual direção do vento teve maior número de ocorrências durante os intervalos. Para facilitar essa leitura, as direções, primeiramente, são arredondadas para valores múltiplos de 10. Assim trabalha-se com 35 direções. Em geral, esta abordagem é suficiente para selecionar o azimute de vento mais apropriado. No entanto, existem exceções.

Por exemplo, no cálculo do dia *TBS* de verão para o Rio de Janeiro o azimute mais frequente é 280° e, para ele, a velocidade média do vento é 1,9 m/s. Porém, o azimute 260° tem apenas 2 ocorrências a menos e nele a velocidade média é muito maior, chegando a 3,4 m/s. É seguro dizer que este segundo azimute teria uma influência nos cálculos muito maior que a do primeiro, sem que a diferença no número de ocorrências seja significativa. Portanto, a velocidade média para cada azimute deve ser considerada na seleção da direção aplicada.

Isto é contornado com uma solução pouco usual, mas que se mostra satisfatória: para cada azimute, o número de ocorrências é multiplicado pela velocidade média (em m/s). O azimute que resultar no maior produto é a direção escolhida para o Dia de Projeto. Já é de se esperar que os parâmetros de vento não façam grande diferença neste trabalho, pois as simulações aplicadas são para edificações com ar condicionado. Contudo, seria interessante que pesquisas futuras para sistemas climatizados por ventilação natural adotassem esse mesmo critério e verificassem sua relevância.

5. SIMULAÇÃO E RESULTADOS

Finalmente, após a obtenção de Dias de Projeto plenamente definidos, utiliza-se simulação computacional para verificar o efeito de sua aplicação. De forma a minimizar a presença de variáveis de cálculo e, conseqüentemente, reduzir a complexidade da análise, a construção escolhida para a simulação é bastante simples. Trata-se de um prédio de escritórios de pequeno porte, com dimensões 12 m x 12 m x 3 m, com 8 janelas e interior sem divisões, de modo que há apenas uma zona a ser climatizada. A climatização é feita por um único aparelho condicionador de ar, do tipo *split*. Uma representação esquemática desta construção aparece na Figura 5.1.

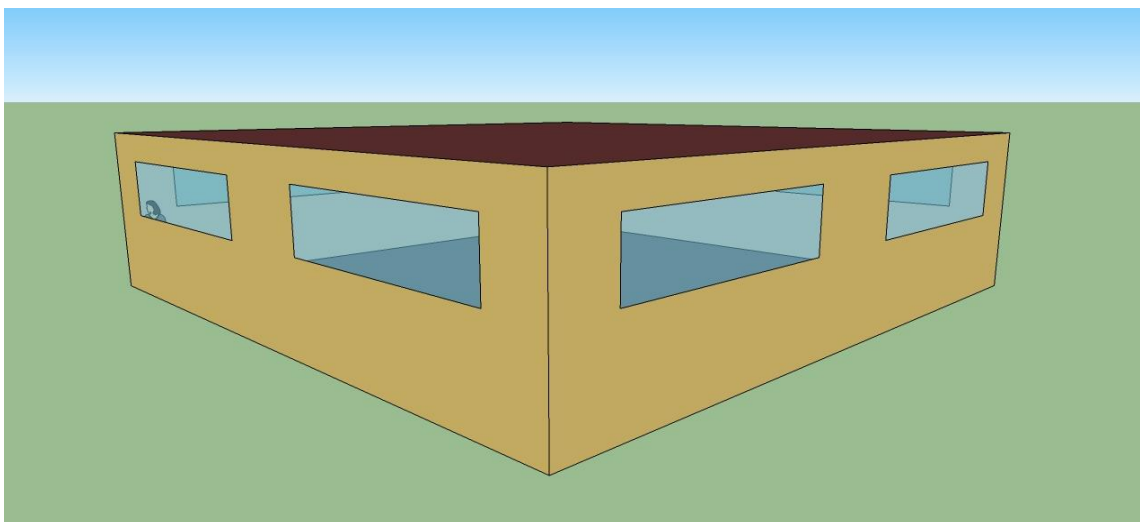


Figura 5.1. – Desenho esquemático da edificação simulada

Para cada cidade abordada são efetuadas duas simulações: uma utilizando apenas os dados de Dias de Projeto da ASHRAE e outra utilizando apenas os Dias de Projeto produzidos neste trabalho. As variáveis de saída escolhidas para avaliação dos resultados são carga térmica de verão [W], carga térmica de inverno [W], vazão de ar requerida [m^3/s], fator de calor sensível e vazão mínima de ar exterior [m^3/s]. Sabe-se que esse último parâmetro deve ser igual para todas as simulações, pois depende apenas dos fatores internos, que não se alteram. O valor encontrado para ele é $0,09 \text{ m}^3/\text{s}$. Os demais parâmetros calculados aparecem na Tabela 5.1.

Para cada cidade, a simulação aplica todos os dias de projeto produzidos e utiliza aquele que fornecer o maior valor de carga térmica requerida para dimensionar o equipamento de climatização. Na maior parte dos casos, os dias de projeto que acabam tendo esta finalidade são os dias *TBS* (tanto de verão quanto de inverno),

mas há duas notórias exceções: para Porto Alegre e São Paulo o Dia de Projeto que fornece a carga mais elevada no verão é o de entalpia específica.

A Tabela 5.1 apresenta os principais resultados da simulação. Nela, além dos valores de carga térmica e vazão de ar calculados, aparecem as diferenças em termos percentuais para os valores obtidos em dias produzidos em relação aos da ASHRAE. Nota-se que a aplicação da metodologia proposta neste trabalho resulta num projeto de máquinas com capacidade prescrita bem menor, de maneira geral. A análise em arquivos “intermediários”, ou seja, que apresentam alguns parâmetros determinados conforme este trabalho e outros seguindo os padrões da ASHRAE permite aferir quais as causas desta redução.

Para dias de verão, a diminuição da carga térmica deve-se quase que totalmente à aplicação dos perfis de radiação. Sozinha, a utilização destes perfis é responsável por uma redução média de 19,9%, que ocorre aproximadamente na mesma proporção em todas as cidades. Já os perfis de temperaturas, no entanto, têm efeitos bem diferentes conforme a localidade. Nas cidades mais ao sul, Porto Alegre e São Paulo, o emprego de perfis de temperatura eleva a carga térmica requerida, enquanto que, nos demais municípios, ocorre diminuição com a utilização deles (ainda que bem menos significativa que a provocada pelos perfis de radiação). Isso faz com que a redução da carga de verão em Porto Alegre e São Paulo seja bem menos significativa que nas localidades mais ao norte.

Para condições de inverno, primeiramente, há de se notar que, nas cidades mais quentes, a carga térmica calculada para os dias ASHRAE já é muito pequena. Não há grande interesse, portanto, em analisar as consequências da aplicação de novos dias de projeto nestes locais, visto que o efeito dos mesmos seria pequeno, em termos absolutos. Já para as cidades onde o inverno é mais expressivo, em especial Porto Alegre e São Paulo, verifica-se, novamente, redução da carga térmica requerida. Desta vez, porém, as aplicações dos perfis de temperatura e de radiação têm efeito praticamente igual, não havendo um único grande responsável pela diferença.

Chama atenção também o aumento de carga térmica para a cidade do Rio de Janeiro no inverno, contudo isso não se deve à metodologia praticada neste trabalho e sim à divergência nos arquivos climáticos. O arquivo climático do Rio de Janeiro disponibilizado pelo LABEEE se refere a medições feitas na Vila Militar e não em um aeroporto, como é para os demais municípios estudados. Como as tabelas ASHRAE são todas baseadas em dados de aeroportos é natural que haja divergência. Por fim, a vazão de ar requerida, um parâmetro utilizado no dimensionamento e seleção de equipamentos de climatização, também tem seu valor expressivamente decrescido, desta vez sem haver grandes distinções conforme a localidade.

Tabela 5.1 – Parâmetros calculados na simulação

	Fator de Calor Sensível	Vazão de ar requerida [m ³ /s]	Diferença	Capacidade de aquecimento requerida [W]	Diferença	Capacidade de resfriamento requerida [W]	Diferença
Brasília – Dias ASHRAE	0.798655	0.805252	-30,9%	9617.64	-50,4%	13329.79	-30,9%
Brasília – Dias Produzidos	0.798655	0.556326		4771.30		9209.18	
Manaus – Dias ASHRAE	0.704941	0.873423	-14,0%	1920.13	+2,8%	19404.35	-15,9%
Manaus – Dias Produzidos	0.710898	0.750833		1974.07		16325.84	
Porto Velho – Dias ASHRAE	0.711753	0.868287	-19,7%	4189.06	-31,1%	18822.21	-19,5%
Porto Velho – Dias Produzidos	0.711046	0.696969		2888.01		15146.63	
Porto Alegre – Dias ASHRAE	0.729229	0.964782	-19,6%	14184.37	-10,1%	19688.40	-2,2%
Porto Alegre – Dias Produzidos	0.676083	0.775542		12758.30		19258.56	
Rio de Janeiro – Dias ASHRAE	0.717229	0.931118	-24,3%	5384.45	+20,0%	19798.05	-26,1%
Rio de Janeiro – Dias Produzidos	0.724162	0.705191		6463.41		14639.65	
Salvador – Dias ASHRAE	0.699336	0.851588	-28,2%	2841.04	-28,9%	19314.46	-27,8%
Salvador – Dias Produzidos	0.697543	0.611030		2021.01		13951.68	
São Luís – Dias ASHRAE	0.703071	0.890495	-31,1%	1861.37	-2,9%	19919.59	-30,1%
São Luís – Dias Produzidos	0.699185	0.613617		1807.26		13924.97	
São Paulo – Dias ASHRAE	0.782442	0.906247	-39,4%	10319.07	-20,9%	15693.70	-13,1%
São Paulo – Dias Produzidos	0.676083	0.549299		8165.18		13640.41	

6. CONCLUSÕES

Primeiramente, é notório que a utilização de Dias de Projeto baseados unicamente em medições acarreta diferenças bastante significativas no projeto de condicionadores de ar. A capacidade requerida às máquinas é consideravelmente reduzida graças à menor vazão de ar e, em geral, menor carga térmica. Cabe salientar, contudo, que as duas cidades de clima mais frio entre as analisadas foram as que apresentaram menor discrepância em relação aos resultados obtidos com os Dias de Projeto ASHRAE. É um possível indicativo de que a forma de obtenção dos dias-padrão da ASHRAE se aplique melhor a localidades com clima mais próximo dos Estados Unidos, onde é a sede da instituição. Seria interessante, futuramente fazer esta mesma análise para outros países, de climas diversos.

Algumas aproximações utilizadas pela ASHRAE são, de fato, irreais e não condizem com o encontrado em qualquer situação verdadeira. A ausência de amplitude de temperatura em dias de inverno é um exemplo claro. Conforme ilustrado pelo Apêndice IV, não existe qualquer intervalo de 24 horas, ao longo de um ano, no qual a temperatura não varie, muito menos em dias críticos de inverno, que, por natureza, já costumam ser dias com amplitude acima da média. Apenas para reforçar o argumento, esta mesma análise foi feita para cidades de outros países, de clima mais frio, e o resultado foi similar.

Além disso, mesmo a amplitude de temperatura no verão, que é considerada pela ASHRAE, pode ter seu efeito subestimado pela metodologia da mesma. Em cidades mais próximas à linha do equador, a temperatura não costuma variar muito ao longo dos dias, o que resulta numa amplitude média de valor pequeno. Dias críticos de verão, por outro lado, costumam ter amplitudes bem acima da média, as quais a ASHRAE não leva em conta. Isso explica porque, para as cidades mais ao norte do Brasil, a adoção do perfil de temperatura provoca redução da carga térmica, enquanto que para cidades em pontos mais ao sul ocorre o inverso.

O parâmetro responsável pela maior divergência, no entanto, é o perfil de radiação. Nota-se que, por mais que a ASHRAE tenha se mostrado interessada em desenvolver métodos de obtenção de perfis mais próximos da realidade, os modelos atualmente empregados ainda levam a resultados muito conservadores. O modelo ASHRAETau, ainda que seja considerado uma evolução em relação ao ASHRAEClearSky – principalmente em relação aos efeitos da irradiação difusa – superestima o ganho de calor por radiação no verão, já que, quando aplicado a simulações no *EnergyPlus*[®], os valores aproximados para irradiação direta e difusa num único dia precisam ser considerados para um mês inteiro. Dada a grande influência que a radiação apresentou no valor da carga térmica, fica a sugestão, para pesquisas futuras, de elaborar Dias de Projeto baseados na irradiação crítica.

Este trabalho é focado exclusivamente na influência dos Dias de Projeto em equipamentos de ar-condicionado, porém também seria interessante observar o resultado de sua utilização em outros tipos de sistemas, tais como climatização por ventilação natural, no qual haveria oportunidade para estudar, com mais detalhes, o efeito dos parâmetros relacionados ao vento.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASHRAE, *American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers*, “**Handbook of Fundamentals**”, capítulo 14, Atlanta, EUA, 2013.

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas, **NBR 15575**: Edificações habitacionais – Desempenho. Rio de Janeiro, 2012.

Beyer, P.; “**Climatização, Ventilação, Aquecimento, Refrigeração e Ar Condicionado**”, apostila da disciplina ENG03112, DEMEC, 2015.

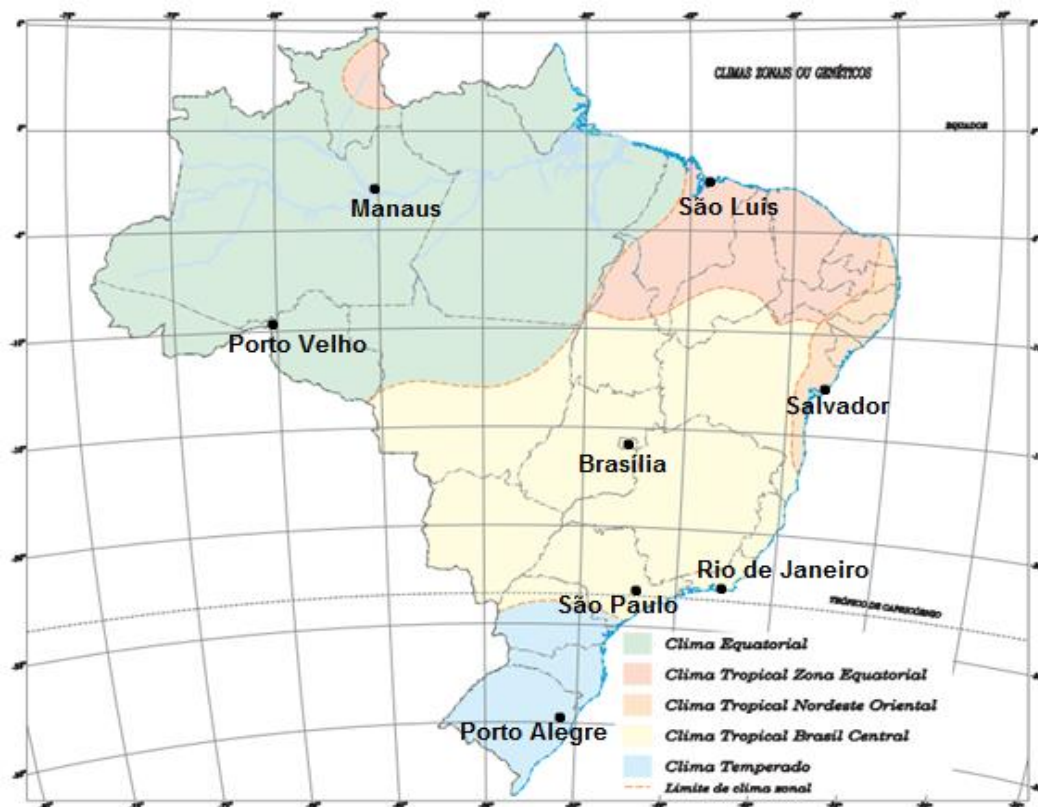
EnergyPlus. “**Engineering Reference**”, Lawrence Berkeley National Laboratory, 2013a.

EnergyPlus. “**Input-Output Reference**”, Lawrence Berkeley National Laboratory, 2013b.

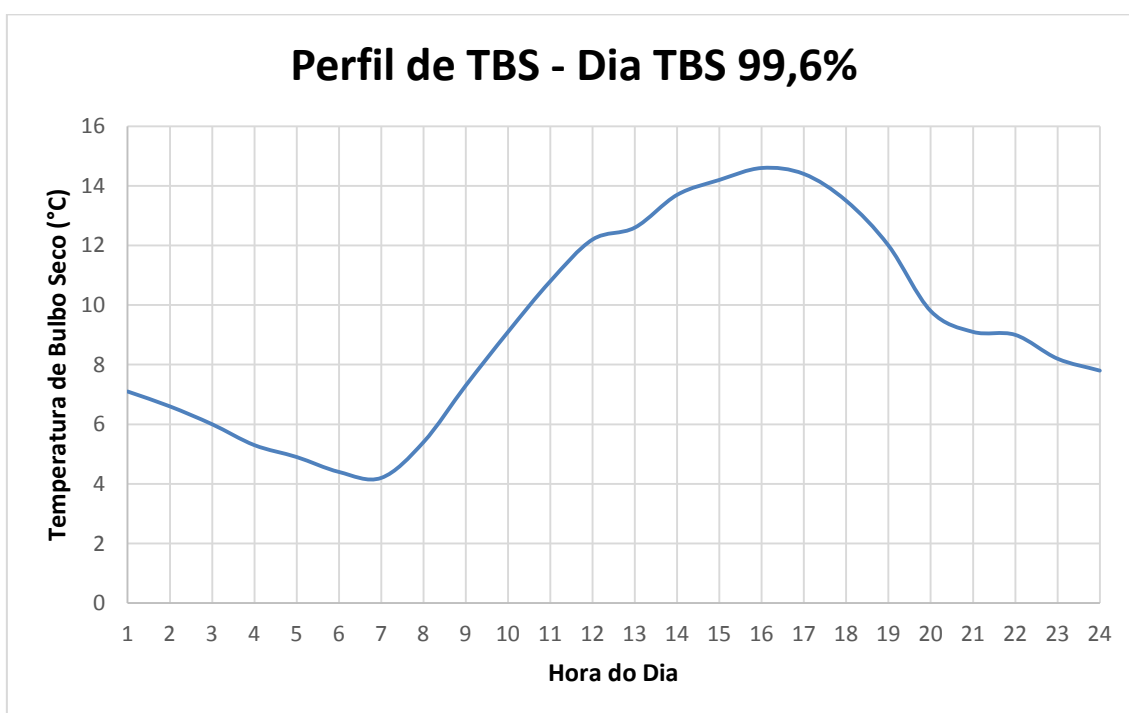
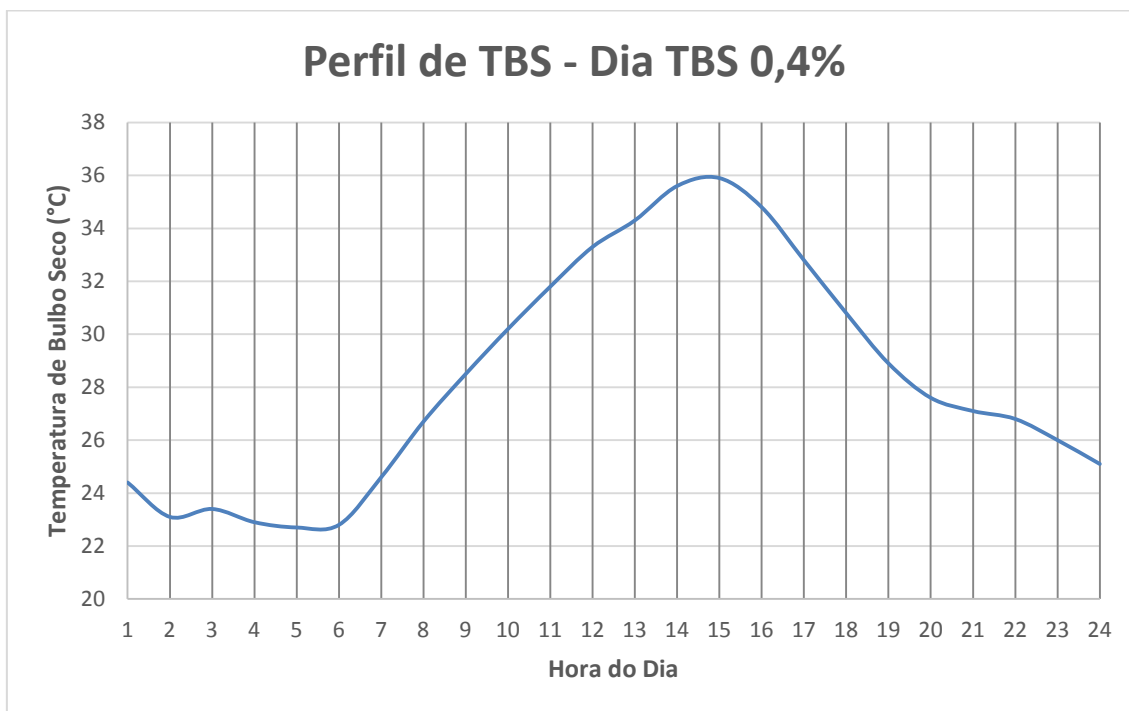
LabEEE, Laboratório de Eficiência Energética em Edificações, “**Arquivos Climáticos**”, disponível em <<http://www.labeee.ufsc.br/downloads/arquivos-climaticos>>, acessado em 15/04/2015.

NCDC, *National Climatic Data Center*, “**Climate Information**”, disponível em <<http://www.ncdc.noaa.gov/climate-information>>, acessado em 02/08/2015.

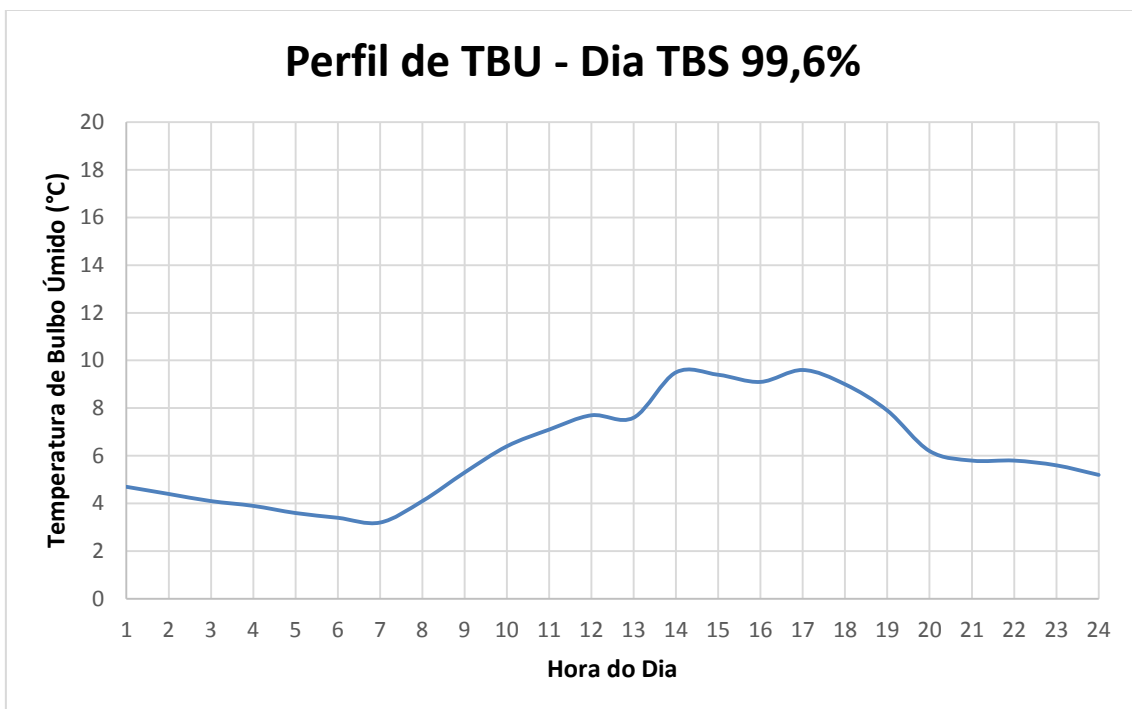
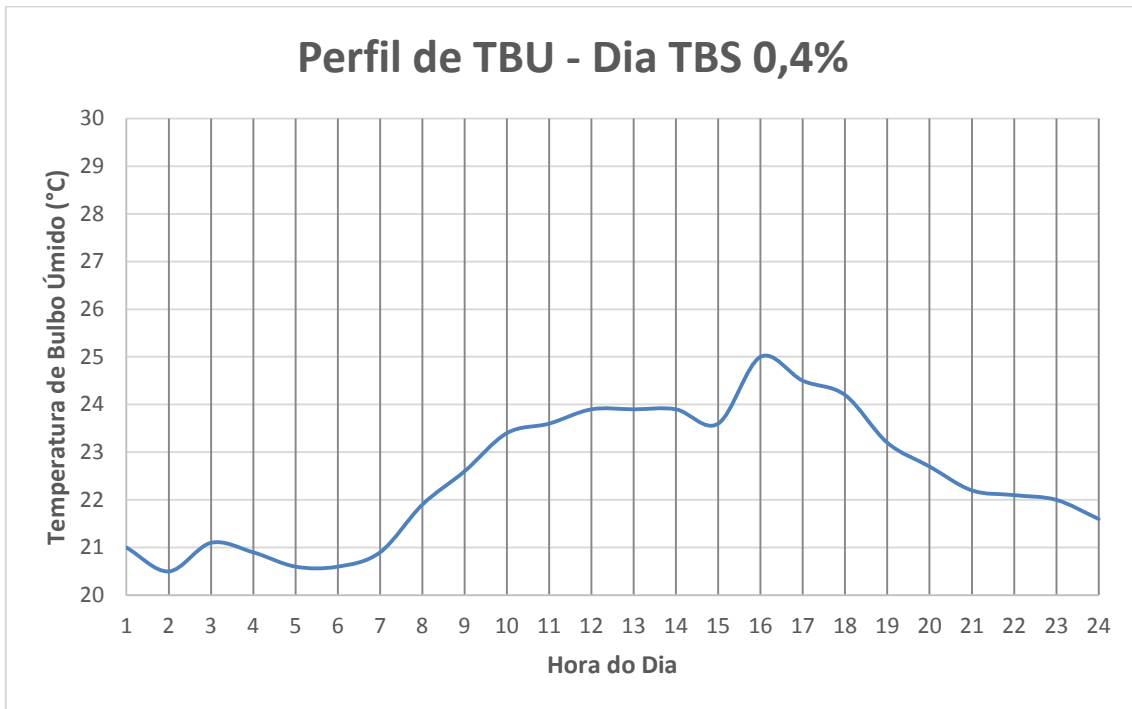
ANEXO I – Localização dos municípios avaliados nas zonas climáticas do território brasileiro



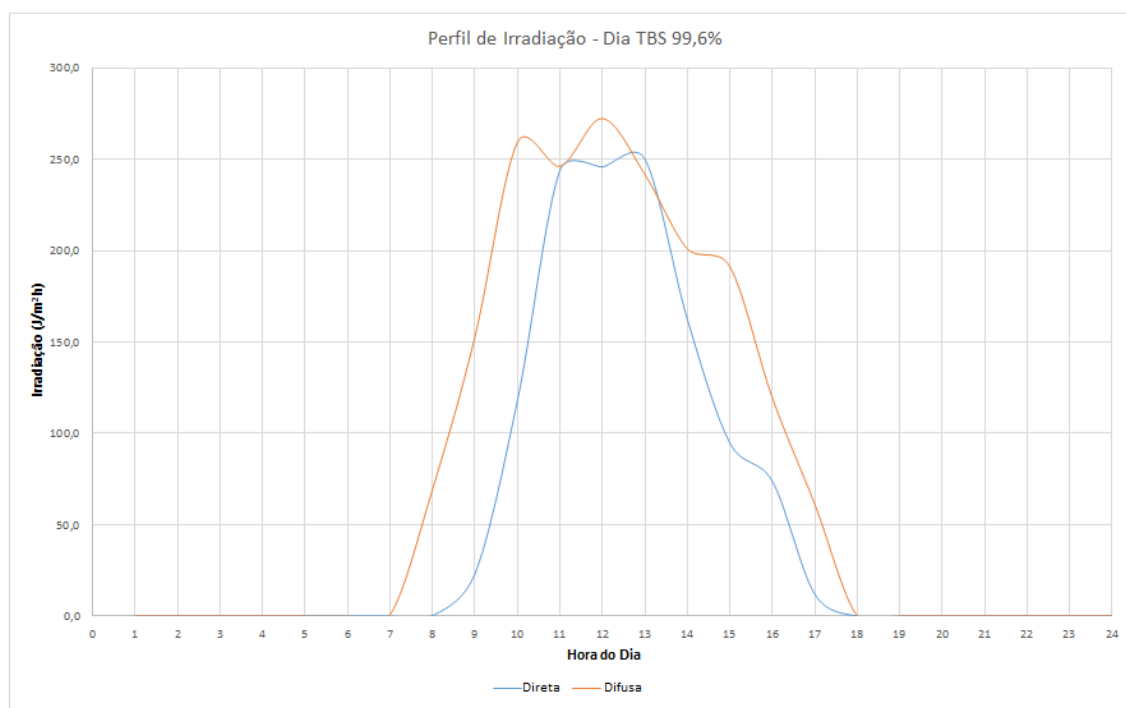
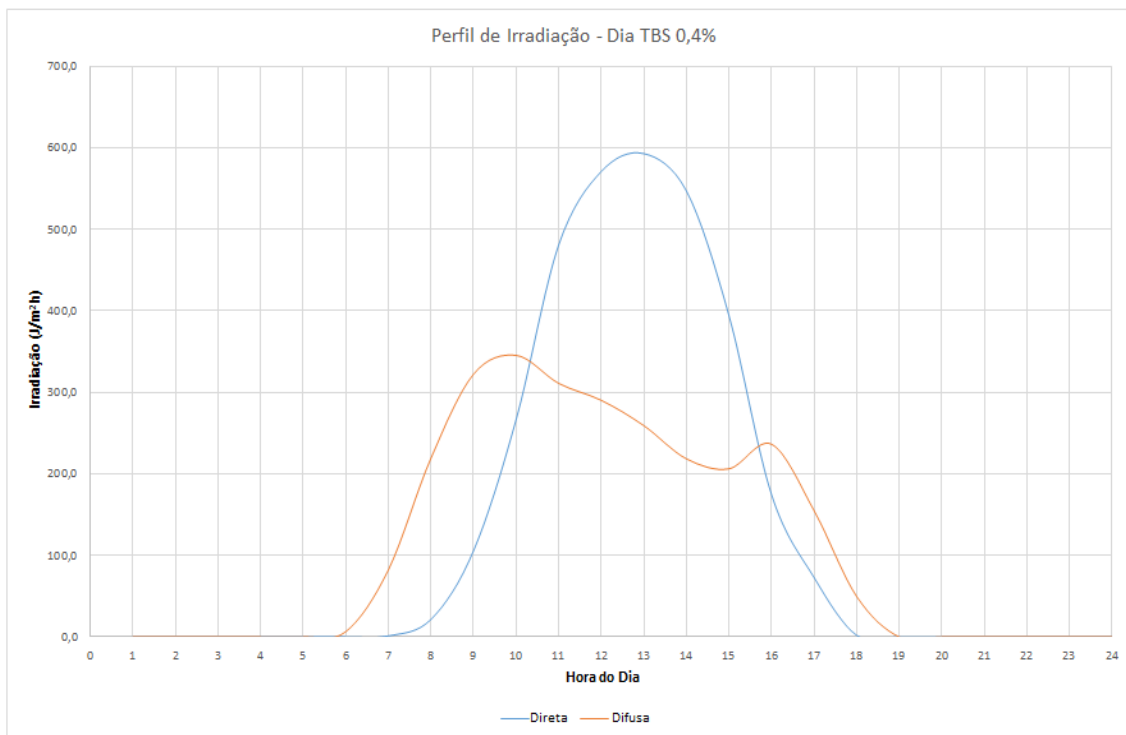
APÊNDICE I – Perfis de TBS para Dias de Projeto produzidos, para Porto Alegre.



APÊNDICE II – Perfis de TBU para Dias de Projeto produzidos, para Porto Alegre.



APÊNDICE III – Perfis de irradiação para dias de projeto produzidos, para Porto Alegre.



APÊNDICE IV – Análise das menores amplitudes de temperatura para cada cidade.

Cidade	Menor amplitude de temperatura no ano (°C)	Menor amplitude de temperatura em Dias críticos de inverno (°C)
Brasília	1,6	9,6
Manaus	1,5	4,4
Porto Alegre	1,3	7,8
Porto Velho	1,3	3,4
Rio de Janeiro	1,2	9,1
Salvador	1,5	4,4
São Luiz	1,2	6,7
São Paulo	1	5,6